МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Г. В. Априков

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ

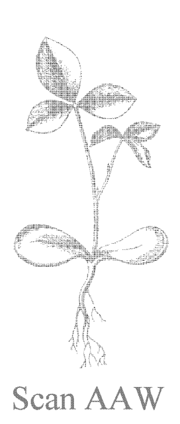


МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 691

Г. В. АПРИКОВ

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1969

6Ф2.12
А 77
УДК 621.375.145

Априков Г. В.

А 77 Регулируемые усилители. М., «Энергия», 1969,

80 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 691).

Рассматриваются различные способы регулировки усиления ламповых и транзисторных усилителей низкой частоты; описываются регулируемые усилители с термо-, фото- и магниторезисторами и датчиками Холла в цепях управления и их применение.
Книга предназначена для подготовленных радиолюбителей.

3-4-5
352-68

6Ф2.12

Априков Генрих Владимирович

Регулируемые усилители

Редактор *Б. А. Снедков*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Технический редактор *Т. И. Павлова*

Корректор *Н. В. Лобанова*

Сдано в набор 28/IV 1968 г. Подписано к печати 15/I 1969 г. Т-02509
Формат $84\times108^1/_{32}$ Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 4,2 Уч.-изд. л. 5,58
Тираж 50 000 экз. Цена 24 коп. Зак. 1319

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена регулируемым усилителям и ставит своей целью ознакомить радиолюбителя с разнообразными способами регулировки усиления низкочастотных усилителей, с принципами работы регулируемых усилителей и потенциометрических регуляторов усиления и основными областями их применения. Автором делается попытка обобщить и систематизировать имеющийся в этой области материал. Автор не стремился к полноте изложения всех вопросов теории и расчета регулируемых усилителей.

В гл. 1 книги приведены параметры и характеристики регулируемых усилителей, дана их классификация по принципу действия и виду регулировочных характеристик.

Гл. 2 посвящена электромеханическим регуляторам усиления.

В гл. 3, 4 и 5 рассказывается о ламповых, транзисторных и других регулируемых усилителях.

В гл. 6 описываются различные применения регулируемых усилителей в радиоэлектронике, звукозаписи, измерительной технике и акустике.

Автор с благодарностью примет все критические замечания и пожелания, которые просит направлять по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

Г. Априков

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Регулируемые усилители (РУ) представляют собой устройства, позволяющие изменять уровень передаваемого сигнала в зависимости от каких-либо управляющих воздействий. Управление РУ может осуществляться как путем механического воздействия оператора на регулятор, так и путем изменения управляющего напряжения — дистанционно или автоматически. В этой книге отдельно рассмотрим потенциометрические регуляторы, имеющиеся во всех радиоприемниках и телевизорах и служащие для регулирования громкости. Такие регуляторы являются элементами регулируемого усилителя. Регулируемые усилители — более общее понятие. Они представляют собой регулируемые по усилению каскады на электронных приборах. Уровень сигнала на выходе РУ зависит от изменения параметров входящего в него электронного прибора и связан с величиной управляющего напряжения, подаваемого на РУ. Нас в основном будут интересовать РУ, регулируемые путем изменения управляющего напряжения.

Регулируемые усилители характеризуются рядом параметров; рассмотрим наиболее важные из них.

Коэффициент усиления определяется отношением напряжения на выходе ($U_{вых}$) регулируемого усилителя к напряжению на входе ($U_{вх}$). Коэффициент усиления нередко выражают в логарифмических единицах — децибелах

$$K\ [дб] = 20 \lg K = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

Если коэффициент усиления РУ меньше единицы, то его называют коэффициентом передачи. Под коэффициентом усиления РУ обычно имеют в виду максимальную величину коэффициента усиления, которую можно получить с данного усилителя (слово «максимальный» для упрощения опускают).

В регулируемых усилителях, у которых коэффициент усиления больше единицы, изменение его происходит в зависимости от изменения режима электронного прибора по постоянному току. Такие РУ иногда называют «режимными». Они представляют собой усилитель-

ный каскад на электронной лампе или транзисторе, на один из электродов которых подается управляющее напряжение. Изменение управляющего напряжения вызывает перемещение рабочей точки на характеристике прибора, что в конечном счете приводит к изменению коэффициента усиления каскада.

Регулируемые усилители с коэффициентом усиления меньше единицы строятся по схемам управляемых делителей напряжения, в которых в качестве одного из плеч использовано внутреннее сопротивление полупроводникового прибора переменному току (дифференциальное сопротивление). Это сопротивление изменяется в зависимости от каких-либо внешних воздействий на полупроводниковый прибор: электрического или магнитного поля, света и тепла, а интенсивность или сила этих внешних воздействий определяется, в свою очередь, величиной управляющего напряжения.

Коэффициент усиления является далеко не первостепенным параметром РУ. Поэтому следует стремиться получить большой коэффициент усиления только в том случае, если это не отражается на других параметрах РУ.

Диапазон регулирования (глубина регулировки) представляет собой отношение максимального коэффициента усиления $K_{\text{макс}}$ к минимальному $K_{\text{мин}}$ при крайних значениях управляющего напряжения

$$d = \frac{K_{\text{макс}}}{K_{\text{мин}}}.$$

Его удобнее выражать в децибелах

$$D = 20 \lg d = 20 \lg \frac{K_{\text{макс}}}{K_{\text{мин}}}.$$

Диапазон регулирования является, пожалуй, наиболее важным параметром РУ, так как при очень малом диапазоне регулирования РУ, по сути дела, перестает быть регулятором. Самый простой метод увеличения диапазона регулирования состоит в применении двух РУ, включенных последовательно и действующих от одного управляющего напряжения. В этом случае можно в 2 раза расширить диапазон регулирования (в децибелах).

Для расширения диапазона регулирования РУ необходимо уменьшать его минимальный коэффициент усиления $K_{\text{мин}}$. Последний отличен от нуля даже при запертых лампе или транзисторе или при обесточенной схеме из-за прямого прохождения сигнала — передачи сигнала со входа электронного прибора на его выход через обратное сопротивление и междуэлектродную емкость прибора. Напряжение на выходе прибора при запертых лампе или транзисторе или при обесточенной схеме иногда называют о с т а т о ч н ы м

Уменьшить величину $K_{\text{мин}}$ можно путем компенсации остаточного напряжения. Для этой цели в РУ, кроме основного, используются дополнительный канал и сумматор (рис. 1) Усиливаемый сигнал проходит двумя путями: через основной канал, в который включен регулируемый усилитель *РУ*, и через канал компенсации с усилителем *У*. Коэффициент усиления канала компенсации выбран приблизительно равным по абсолютной величине минимальному значению коэффициента усиления $K_{\text{мин}}$ основного канала, когда РУ обесточен Сигналы, снимаемые с выходов *РУ* и *У*, отличаются по

фазе на 180°. На сумматоре *С* сигналы компенсируются, и напряжение на его выходе оказывается значительно меньшим, чем на выходе *РУ*. В результате этого минимальный коэффициент усиления $K_{мин}$ становится очень малым, а диапазон регулирования в соответствии с приведенной выше формулой сильно возрастает.

Для получения хороших результатов необходимо добиваться подобия частотных и фазовых характеристик *У* и *РУ*.

Искажения. В РУ, как и вообще в усилительных устройствах, проявляется несколько видов искажений сигнала. Одним из них являются нелинейные искажения — искажения формы сигнала, вызываемые нелинейностью характеристики электронного прибора, использованного в РУ. В обычных усилителях для уменьшения искажений рабочую точку прибора выбирают в середине прямолинейного участка характеристики и следят, чтобы она не смещалась за пределы этого участка при изменении температуры и напряжения источника питания.

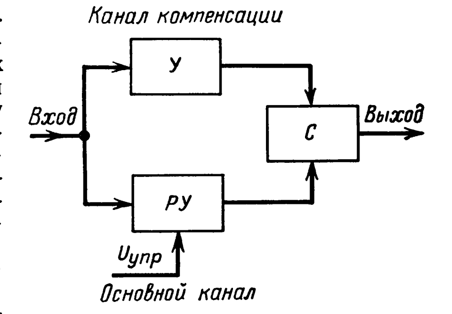


Рис. 1. Схема компенсации остаточного напряжения.

Иное дело в регулируемых усилителях. Работа большинства схем РУ основана именно на нелинейности характеристик. Более того, чем больше нелинейность характеристики регулятора, тем больше, как правило, получается и диапазон регулирования РУ.

В некоторых ламповых схемах РУ для получения максимального коэффициента усиления рабочую точку тоже устанавливают на прямолинейный участок характеристики (подачей на лампу соответствующего напряжения). Нелинейные искажения при этом невелики. Для уменьшения усиления начинают изменять управляющее напряжение таким образом, чтобы рабочая точка переместилась на участок с меньшей крутизной характеристики, зачастую на самую нелинейную часть характеристики. Нелинейные искажения при этом намного возрастут.

Требования получения большого диапазона регулирования и малых нелинейных искажений в некоторых случаях противоречивы, поэтому нередко идут на компромисс, используя вместо одного два включенных последовательно РУ, каждый из которых работал бы в меньшем диапазоне регулирования.

Нелинейные искажения снижаются при уменьшении амплитуды входного сигнала. Поэтому регулировать усиление желательно в первых каскадах усилителя, где выходной сигнал еще довольно мал.

Существенно снизить или даже вовсе устранить нелинейные искажения можно, используя в РУ вместо нелинейных электронных приборов элементы с линейной зависимостью тока от напряжения Таким свойством обладают РУ с термо-, фото- и магниторезисторами в цепях управления.

Количественно нелинейные искажения оценивают коэффициентом нелинейных искажений, в простейшем случае — коэффициентом гармоник. Для этого на вход РУ подают синусоидальный сигнал. При наличии нелинейности на выходе РУ получаются колебания с частотой входного сигнала и амплитудой U_1, называемые основным тоном (первая гармоника), и все гармоники этих колебаний, начиная со второй (амплитуды U_2, U_3, U_4 и т. д.). Тогда коэффициент гармоник

$$K_г = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \ldots}}{U_1}.$$

Если на вход РУ подать не один, а два синусоидальных сигнала с частотами f_1 и f_2, то на его выходе появятся не только гармоники с частотами $2f_1$, $3f_1, \ldots$, $2f_2$, $3f_2\ldots$, но и комбинационные колебания с частотами $f_1 \pm f_2$, $2f_1 + f_2$, $f_1 + 2f_2$ и т. д.

При воспроизведении сложного сигнала, состоящего из большого числа компонентов (музыка, речь), на выходе РУ появится множество комбинационных колебаний, значительно ухудшающих качество передачи звука. Поэтому для характеристики РУ приходится использовать помимо коэффициента гармоник также коэффициент комбинационных (перекрестных) искажений.

Для его измерения на вход РУ подают два синусоидальных сигнала с частотами f_1 и f_2. Коэффициент комбинационных искажений находится как отношение напряжения разностной частоты $f_1 - f_2$ к напряжению частоты f_1, измеренным на выходе РУ, т. е.

$$K_к = \frac{U_{f1-f2}}{U_{f1}}.$$

Следует иметь в виду, что на практике под коэффициентом нелинейных искажений, указываемым в описаниях, обычно подразумевают коэффициент гармоник.

Вторым видом искажений являются частотные искажения, т. е. искажения формы сигнала, вызванные неодинаковым усилением его частотных составляющих. Величина частотных искажений определяется по неравномерности амплитудно-частотной характеристики РУ. Особенностью РУ является то, что частотная характеристика их изменяется в процессе регулирования, при этом на различных участках частотного диапазона появляются подъемы и завалы.

Регулируемые усилители в процессе регулировки воздействуют также на частотные характеристики соседних каскадов, особенно предыдущего.

К искажениям можно отнести также паразитные сигналы, появляющиеся при резком изменении режима работы электронного прибора, в частности при скачкообразном изменении анодного тока лампы (так называемые «щелчки срабатывания»). Для устранения этих паразитных сигналов следует обеспечить достаточно плавное изменение режима работы лампы. Это достигается сглаживанием скачков управляющего напряжения с помощью RC-фильтра с постоянной времени в десятые доли секунды. Действенным средством против этого вида искажений является использование двух

РУ, включаемых по двухтактной схеме. В РУ управляющее напряжение подается на обе лампы одновременно. Паразитные сигналы в этой схеме подавляются, поскольку они поступают на выход в противоположной полярности.

Входное и выходное сопротивления. При разработке усилителей стремятся получить большое входное и малое выходное сопротивления каскада. В ламповых схемах это необходимо для того, чтобы сопротивление нагрузки усилителя (если нагрузкой служит следующий каскад) было во много раз больше сопротивления источника: в этом случае обеспечивается максимальная передача напряжения. В схемах усилителей на транзисторах также стремятся повысить входное и уменьшить выходное сопротивления каскада, но это вызвано необходимостью согласовать сопротивления предыдущего и последующего каскадов, так как в режиме согласования в нагрузку передается максимальная мощность.

В регулируемых усилителях, как в транзисторных, так и в ламповых, применяют такие же меры, но не с целью согласования каскадов, а для того чтобы уменьшить влияние РУ на соседние каскады, приводящее к изменению их коэффициента усиления и частотным искажениям. Регулируемый усилитель с большим входным сопротивлением, даже изменяемым в некоторых пределах, будет оказывать меньшее шунтирующее действие на предыдущий каскад. То же относится и к выходному сопротивлению РУ.

Для увеличения входного сопротивления и уменьшения выходного применяют катодные и эмиттерные повторители, включаемые до и после регулируемых каскадов. В некоторых случаях, если входной сигнал велик, можно увеличить входное сопротивление РУ, подавая на него сигнал через резистор с большим сопротивлением.

Мощность управляющего сигнала — это мощность, необходимая для воздействия на регулируемый каскад с целью получения необходимого диапазона регулирования. Сам по себе этот параметр еще не характеризует работу данного РУ с какой-либо стороны. Повышение требуемой мощности управления связано лишь с неудобствами схемного и конструктивного характера, так как оно вынуждает использовать источник управляющего напряжения большой мощности или же вводить дополнительный мощный усилитель в управляющую цепь. Иногда даже идут на преднамеренное повышение мощности с целью улучшения других параметров РУ.

Под точностью регулирования понимают способность РУ изменять свой коэффициент усиления в строгом соответствии с регулировочной характеристикой и неизменность его параметров от внешних условий (изменения питающего напряжения, температуры, влажности, освещенности и др.). Большая точность регулирования необходима в измерительной аппаратуре, в различных автоматических и компенсирующих устройствах. Она позволяет осуществить идентичную регулировку одновременно несколькими сигналами, для чего РУ должны работать от одного управляющего напряжения совершенно одинаково. Кроме того, при высокой точности регулирования осуществима унификация РУ как элементов устройства и их взаимозаменяемость без какой-либо наладки и подстройки.

Наряду с перечисленными выше параметрами к РУ могут предъявляться и другие требования, как общие, аналогичные требованиям к обычным радиотехническим устройствам (например, стабильность, надежность, к. п. д., малые габариты и вес и т. д.), так и специальные, обусловленные их применением в конкретном устройстве.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В различных РУ изменение коэффициента усиления происходит по разным законам. График зависимости коэффициента усиления РУ от управляющего напряжения носит название характеристики регулирования.

Зависимость K от $U_{упр}$ может быть прямой и обратной. Соответственно график зависимости $K=f(U_{упр})$ будет возрастающим или убывающим.

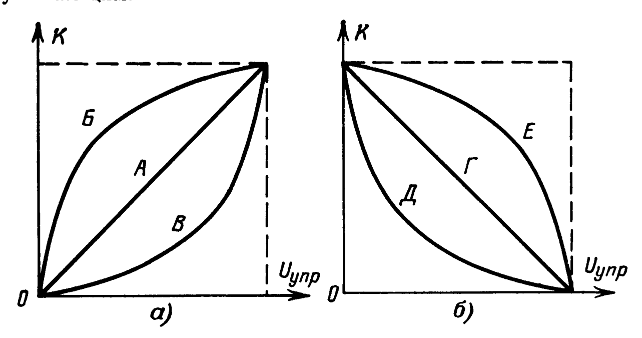


Рис. 2. Регулировочные характеристики РУ.
а — возрастающие; *б* — убывающие.

Примерные характеристики регулирования РУ приведены на рис. 2. Кривые на графиках показывают, что при прямой зависимости коэффициент усиления может изменяться по линейному (*А*), логарифмическому (*Б*) и показательному (*В*) законам. То же относится и к кривым обратной зависимости. В дальнейшем для упрощения эти кривые мы будем называть следующим образом: *А* — линейной, *Б* — выпуклой, *В* — вогнутой возрастающей; *Г* — линейной, *Д* — вогнутой, *Е* — выпуклой убывающей.

Вид характеристики регулирования РУ и ее нелинейность определяются крутизной тех участков характеристик усилительного электронного прибора, по которым перемещается рабочая точка при изменении управляющего напряжения. Если же электронный прибор работает в РУ в качестве одного из плеч управляемого делителя напряжения, то регулировочная характеристика РУ не будет совпадать с характеристикой этого элемента, но зато путем соответствующего выбора резисторов делителя и схемы включения нетрудно получить почти любую наперед заданную кривую.

На рис. 3 и 4 показаны схемы делителей напряжения, используемых в РУ. Параллельный делитель напряжения (рис. 3,*а*) состоит из постоянного резистора R в верхнем плече и управляемого сопротивления r в нижнем плече. При изменении сопротивления r коэффициент передачи делителя изменяется в соответствии с выражением

$$K=\frac{r}{r+R}=\frac{1}{1+\frac{R}{r}}.$$

Диапазон регулирования для данного делителя можно рассчитать по формуле

$$d = \frac{K_{\text{макс}}}{K_{\text{мин}}} = \frac{r_{\text{макс}} + qR}{r_{\text{макс}} + R} = 1 + \frac{q - 1}{1 + \frac{r_{\text{макс}}}{R}},$$

где $r_{\text{макс}}$ — максимальное значение управляемого сопротивления;
q — отношение максимального управляемого сопротивления к минимальному,

$$r_{\text{мин}} = \frac{r_{\text{макс}}}{q}.$$

Из формул видно, какое большое значение имеет выбор сопротивления постоянного резистора R. Для получения большого коэффициента передачи делителя надо выбирать сопротивление резистора R как можно меньшим, в то же время для достижения наибольшего диапазона регулирования оно должно быть максимальным. Кроме того, использование R с малым сопротивлением уменьшает входное сопротивление делителя, что вынуждает применять источник переменного напряжения с малым выходным сопротивлением или включать между предыдущим каскадом и РУ катодный или эмиттерный повторитель. И, наконец, значение сопротивления резистора R сильно влияет на форму кривой зависимости коэффициента передачи делителя от управляемого сопротивления (рис. 3,*б*). При малых R кривая имеет значительную нелинейность. Входное сопротивление подключаемого к делителю каскада должно быть достаточно большим, чтобы не шунтировать управляемое сопротивление r при больших его значениях.

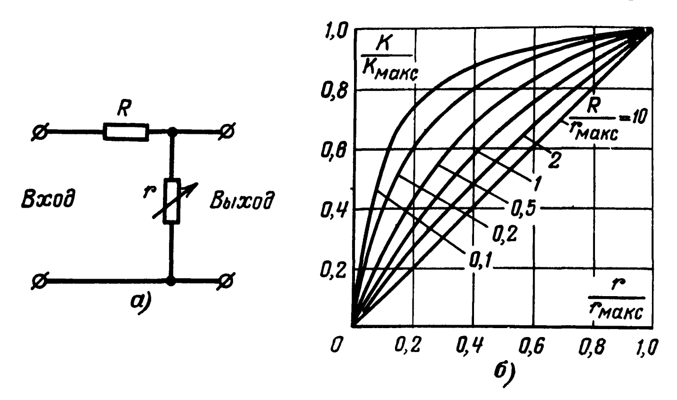


Рис. 3. Параллельный делитель напряжения (*а*) и его регулировочная характеристика (*б*).

В последовательном делителе напряжения (рис. 4) управляемое сопротивление используется в верхнем плече, а в нижнее плечо вклю-

чен постоянный резистор R. Коэффициент передачи этого делителя определяется как

$$K=\frac{R}{r+R}=\frac{1}{1+\frac{r}{R}}.$$

Диапазон регулировки схемы равен:

$$d=\frac{K_{\text{макс}}}{K_{\text{мин}}}=\frac{q\,(r_{\text{макс}}+R)}{r_{\text{макс}}+qR}=1+\frac{q-1}{1+q\frac{R}{r_{\text{макс}}}}.$$

В этом делителе в противоположность первому коэффициент передачи будет максимальным при больших сопротивлениях резистора R, а диапазон регулирования — при малых. При использовании R с большим сопротивлением увеличивается входное сопротивление РУ. Что же касается графиков зависимости коэффициента передачи от изменения управляемого сопротивления, то они по-прежнему будут иметь наибольшую нелинейность при малых значениях сопротивления резистора R. В схеме на рис. 4,*а* вместо резистора R может

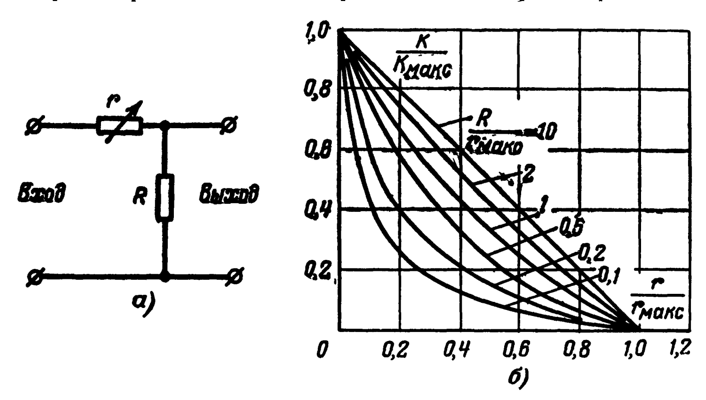


Рис. 4. Последовательный делитель напряжения (*а*) и его регулировочная характеристика (*б*).

быть использовано входное сопротивление последующего каскада, если оно равно сопротивлению этого резистора и не изменяется в процессе регулирования.

Поясним на примере, как можно получить необходимую нам характеристику регулирования с помощью управляемого делителя.

Предположим, что необходимо получить схему РУ с линейной возрастающей характеристикой (вида *А* на рис. 2). Мы располагаем электронным прибором, например фоторезистором, у которого зависимость дифференциального сопротивления от управляющего напряжения изменяется по закону, который графически выражается кривой, близкой к кривой вида *Д* (вогнутой убывающей). Все вы-

числения будем производить в относительных единицах (можно также в процентах).

Прежде всего надо перечертить график изменения сопротивления от управляющего напряжения, выразив его в относительных единицах путем нахождения отношений $r/r_{макс}$ при различных напряжениях. Если управляющее напряжение $U_{упр}$ изменяется не от нуля, то лучше его тоже показать на графике в относительных единицах: $U_{упр}/U_{упр\ макс}$. Далее вычерчиваем необходимый нам график

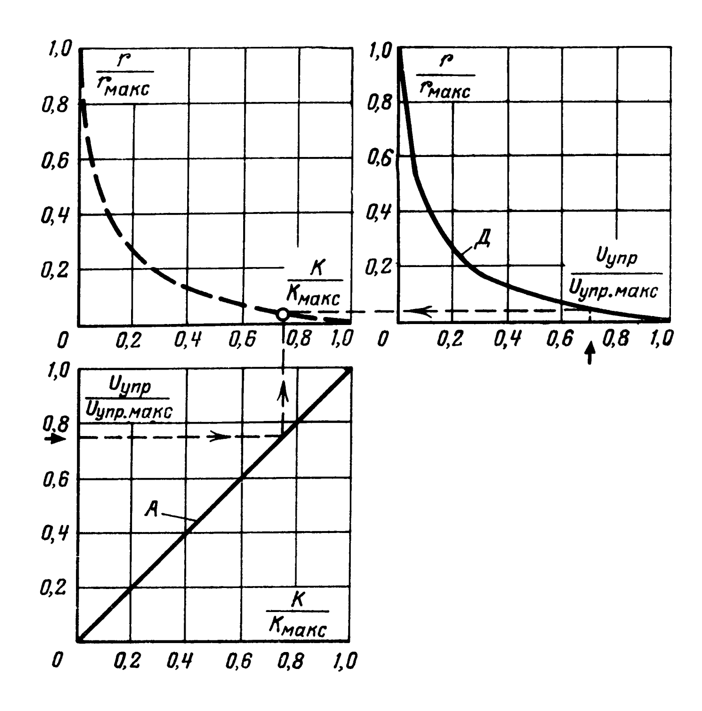


Рис. 5. Построение регулировочной характеристики РУ.

зависимости изменения коэффициента усиления $K/K_{макс}$ от изменения управляющего напряжения. На рис. 5 показаны эти графики: характеристика электронного прибора (кривая вида *Д*) и необходимая нам линейная зависимость (вида *А*).

Построение осуществляем на верхнем левом графике. Для различных отношений $U_{упр}/U_{упр\ макс}$ находим значения $r/r_{макс}$ и $K/K_{макс}$ и отмечаем их точками на верхнем левом графике. На рис. 5 показано нахождение точки графика, соответствующей отношению $U_{упр}/U_{упр\ макс}=0{,}75$. Для ее нахождения по нижнему графику определяем значение $K/K_{макс}$ (оно также равно 0,75, поскольку график имеет линейный характер), а по верхнему правому — значение $r/r_{макс}$ (оно равно 0,035). По этим координатам на верхнем левом графике находим точку (она выделена кружком).

После нахождения аналогичным образом всех других точек через иих проводится плавная кривая (на графике показана жирной штриховой линией).

Мы получили вогнутую убывающую кривую, являющуюся характеристикой последовательного управляемого делителя напряжения. Сравнив полученную кривую с кривыми на графике рис. 4,б, можно видеть, что по нелинейности она близка к кривой, соответствующей $R/r_{\text{макс}}=0{,}1$. Отсюда находим сопротивление резистора R

$$R=0{,}1\,r_{\text{макс}}.$$

Все остальные параметры РУ находятся по формулам, приведенным выше.

Может случиться, что получить ту или иную характеристику этим способом невозможно или найденное значение R слишком ухудшает другие параметры РУ. В этом случае следует выбрать какое-то компромиссное значение R или заменить электронный прибор либо перейти на другую схему регулировки усиления.

Можно также попробовать изменить характер зависимости (с прямой на обратную или наоборот), подав на управляющий элемент постоянное напряжение, чтобы перевести его в другое состояние, например отпертое, а регулировку производить управляющим напряжением другой полярности. Тогда при увеличении управляющего напряжения будет устраняться воздействие постоянного напряжения на регулируемый элемент.

Поясним это на примере. Допустим, что мы имеем РУ, у которого при увеличении управляющего напряжения от 0 до +10 *в* уменьшается коэффициент передачи в соответствии с кривой вида *Д* (вогнутая убывающая), т. е. при нулевом управляющем напряжении коэффициент усиления РУ наибольший, а при напряжении +10 *в* — наименьший.

Если подать на электронный прибор постоянное напряжение смещения +10 *в* так, чтобы оно суммировалось с управляющим напряжением, то наименьший коэффициент будет наблюдаться при нулевом управляющем напряжении, а максимальный — уже при напряжении — 10 *в*. В этом случае мы получим РУ с характеристикой вида *Б* (выпуклая возрастающая). Таким образом, при подаче напряжения смещения на электронный прибор соответствующей полярности регулировочная характеристика получается противоположных зависимости и вида, т. е. осуществляется «переворачивание» регулировочной характеристики РУ.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РЕЗИСТИВНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ УСИЛЕНИЯ

РУЧНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Ручные регуляторы усиления представляют собой приборы, коэффициент передачи которых изменяется при непосредственном воздействии оператора. Простейший ручной регулятор усиления — это переменный резистор, включенный потенциометром перед усилителем или после первых его каскадов. При включении потенциометра перед усилителем устраняется перегрузка первого каскада слишком силь-

ными сигналами, которая могла бы привести к появлению больших нелинейных искажений; однако в этом случае ухудшается отношение сигнал/шум. При включении же его после первых каскадов ослабляется относительное воздействие внешних полей, так как на регулятор подается большая амплитуда полезного сигнала. Первый способ включения применяется при больших уровнях входного сигнала, а второй — при малых.

Ручной регулятор усиления звука в приемниках и усилителях называют регулятором громкости. Сопротивление регулятора громкости для ламповых схем выбирают в пределах 150—500 *ком*, т. е. меньше сопротивления подключенной к нему нагрузки, в данном случае входного сопротивления лампы. Для возможности плавного изменения громкости звучания применяют переменные резисторы с логарифмическим законом изменения сопротивления от угла поворота оси (зависимость В) и с большим диапазоном регулирования.

Диапазон регулирования сигнала переменным резистором, как и всех РУ, определяется отношением максимального напряжения к минимальному, которое можно снять с движка резистора при повороте его оси. Минимальное же напряжение, снимаемое с резистора, зависит от его начального сопротивления, т. е. наименьшего сопротивления, которое еще можно получить при плавном повороте оси, после чего скачком получается нулевое сопротивление (щетка резистора переходит с угольной подковки на токопроводящий участок).

Наибольшим диапазоном регулирования обладают переменные резисторы типа СПЗ-12 (50—60 *дб*) и типа СПЗ-7 (45 *дб*), в то время как у наиболее распространенных резисторов типа СП он составляет всего 36 *дб*.

В РУ на транзисторах потенциометрический регулятор усиления (рис. 6,*а*) можно применить только в том случае, когда входное сопротивление каскада достаточно велико и превышает сопротивление самого потенциометра. В большинстве же случаев входное сопротивление транзисторного каскада довольно мало. Поэтому в схемах на транзисторах применяются иные способы регулирования усиления. Одна из схем регулирования показана на рис. 6,*б*, где сопротивление регулятора входит как в цепь нагрузки предыдущего каскада, так и во входную цепь последующего. При перемещении движка резистора ближе к заземленному концу уменьшается сопротивление нагрузки по переменному току и увеличивается сопротивление в цепи базы.

В качестве регулятора нередко применяют переменный резистор, включаемый последовательно в цепь связи между каскадами (рис. 6,*в*). Для увеличения диапазона регулирования используется комбинированный регулятор (рис. 6,*г*).

Усиление можно регулировать также изменением отрицательной обратной связи по напряжению и по току во входном каскаде усилителя, как это показано на рис. 6,*д* и *е*. Во второй схеме при регулировке изменяется сопротивление переменному току в цепи эмиттера и соответственно коэффициент усиления каскада. Емкости конденсаторов *С* должны быть достаточно большими для равномерного регулирования усиления во всем диапазоне частот.

Ступенчатый регулятор усиления (рис. 6,*ж*) позволяет регулировать усиление скачкообразно по любому закону. Чтобы при переключениях не происходило пропадания звука, переключатель *П* должен обеспечивать переход движка с одного контакта на другой без разрыва цепи. Число положений переключателя (ступеней регулиро-

вания) зависит от общего диапазона регулирования и выбирается таким образом, чтобы на одно положение переключателя приходилось 1,5—3 *дб*. В этом случае при переходе с одного контакта на другой громкость звука изменяется плавно и незаметно. Обычно ступенчатый регулятор усиления имеет от 10 до 20 положений.

Приведенные выше схемы регуляторов усиления приблизительно одинаково ослабляют напряжение всех частот. Особенностью же

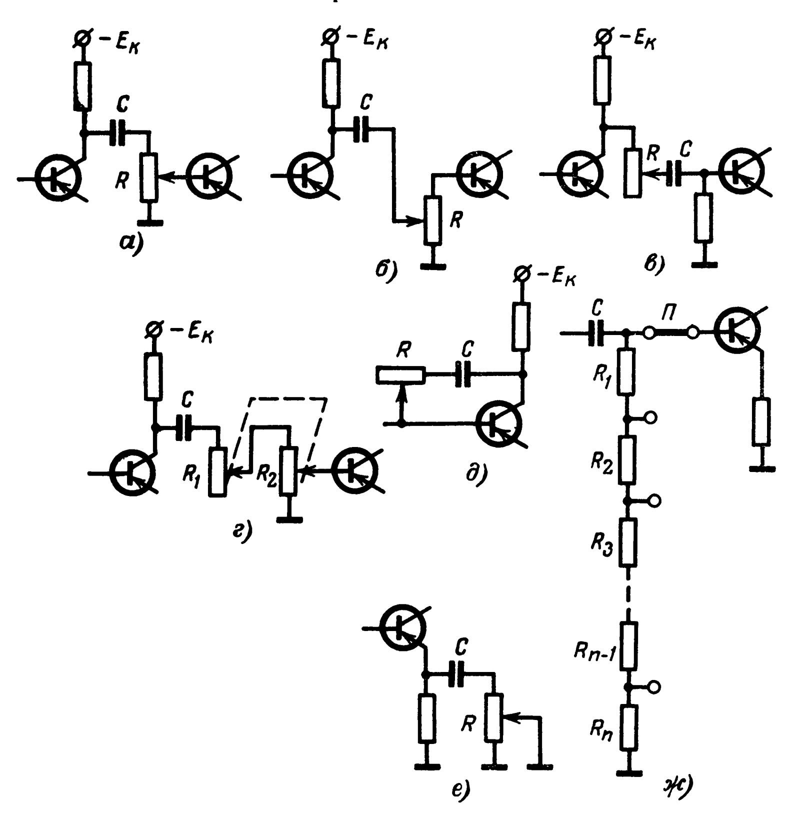


Рис. 6. Схемы ручных резистивных регуляторов усиления.

нашего уха является то, что оно имеет различную чувствительность к разным частотам, которая к тому же зависит от уровня громкости. С уменьшением громкости особенно резко снижается восприятие низших и частично высших звуковых частот. Поэтому для равномерного восприятия всех частот при малых общих уровнях громкости низшие и высшие области звукового диапазона должны воспроизводиться с большей громкостью, чем средние частоты. Для этого в высококачественных усилителях применяют компенсированные регуляторы громкости, которые наряду с изменением общего уровня гром-

кости изменяют частотную характеристику усилителя таким образом, чтобы восполнить указанные недостатки.

В большинстве случаев производится корректировка характеристики только в области низших частот. Обычно применяемые для этого простые компенсированные регуляторы громкости позволяют получить некоторое дополнительное усиление низших частот при установке движка переменного резистора в положение малой громкости. Такие резисторы имеют дополнительный контакт — отвод от части резистора. В схеме к промежуточному отводу потенциометра присоединяют цепочку из резистора и конденсатора, шунтирующую нижнюю часть потенциометра по высокой частоте. При необходимости более точной корректировки приходится применять потен-

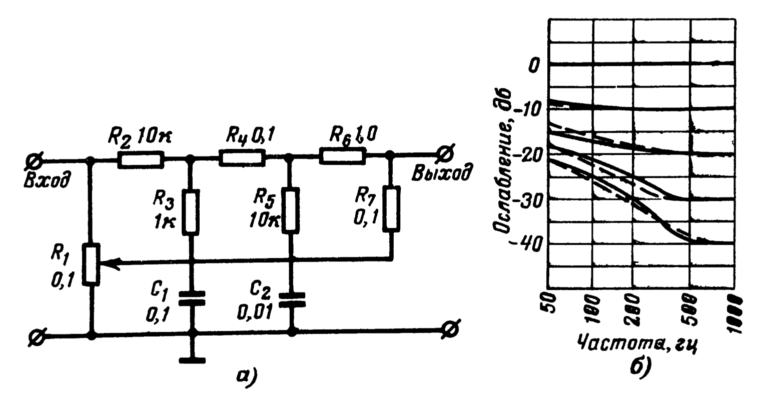


Рис. 7. Схема компенсированного регулятора громкости и его частотные характеристики.

циометры с двумя или даже с тремя отводами либо несколько спаренных потенциометров, что значительно усложняет схему регулятора. Кроме того, почти все компенсированные регуляторы громкости вносят заметные потери усиливаемого напряжения (максимальный коэффициент передачи всех регуляторов много меньше единицы) и имеют непостоянное входное сопротивление, зависящее от положения движка потенциометра.

Схема компенсированного регулятора громкости (рис. 7,*а*), на которую хочется обратить внимание радиолюбителей, интересна тем, что она дает очень хорошее приближение к кривым равной громкости и в то же время не имеет никаких дорогостоящих и сложных деталей. Регулятор громкости содержит потенциометр R_1 без каких-либо отводов и двузвенный *RC*-фильтр низших частот (первое звено $R_2R_3C_1$, а второе $R_4R_5C_2$). На вход регулятора подается переменное звуковое напряжение, подлежащее регулированию. На выход регулятора с фильтра с резистора R_6 поступает напряжение низших частот, а с резистора R_7 — напряжение всех частот звукового диапазона. Соотношение этих напряжений зависит от положения движка потенциометра R_1. При установке движка в верхнее по схеме положение, соответствующее максимальной громкости, напряжение, снимаемое с движка потенциометра, намного превышает напряжение, получаемое после фильтра; на выход регулятора проходят все ча-

стоты, и характеристика его имеет вид прямой линии (верхняя сплошная линия на рис. 7,*б*).

Если установить движок потенциометра в нижнее положение, что соответствует малым громкостям, на выходе регулятора будут преобладать низшие частоты, прошедшие через *RC*-фильтр. Так, при ослаблении средних и высших частот на 40 *дб* и более низшие частоты будут ослабляться на 20 *дб* (нижняя сплошная кривая на рис. 7,*б*).

Как видно из рисунка, характеристики описываемого компенсированного регулятора (сплошные линии) очень близки к кривым равной громкости в области низших частот (штриховые линии).

При желании можно осуществить корректировку характеристики также и в области высших частот. Для этого необходимо подключить между входом и выходом регулятора еще один фильтр, но уже высших частот, или же в схеме на рис. 7,*а* подключить параллельно резисторам R_2 и R_4 (либо одному из них) конденсаторы небольшой емкости.

По сравнению с известными схемами компенсированных регуляторов громкости данный регулятор имеет также следующие достоинства:

потери напряжения звуковой частоты, вносимые регулятором, практически неощутимы. Если отпаять от схемы резистор R_6, получим обычный регулятор громкости без тонкомпенсации. Коэффициент передачи регулятора на средних и высших частотах в этом случае изменится не более чем на 1 *дб*. Можно в любое время перейти на обычную регулировку громкости (что может понадобиться при наладке каскадов приемника, снятии характеристик и т. п), отключив фильтры низших частот путем отсоединения любого вывода резистора R_6;

входное сопротивление схемы регулятора громкости, нагружающее предыдущий каскад и определяющее его усиление, практически зависит от сопротивления резисторов R_2, R_3 и емкости конденсатора C_1 и равно 10 *ком* независимо от положения движка потенциометра.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В приведенных выше схемах регулировка усиления осуществляется изменением сопротивления резисторов путем непосредственного воздействия на них оператора. Для того чтобы применить эти схемы для дистанционного или автоматического управления, надо воздействовать на них каким-либо другим путем, например с помощью двигателя, шагового искателя и т. п. Чаще всего в таких случаях применяют миниатюрные двухфазные двигатели.

Схема электромеханического регулятора усиления показана на рис 8. Аналогичная схема применена в радиоприемнике высшего класса «Фестиваль». Ось движка потенциометра R_1 — регулятора громкости в приемнике механически сопряжена с осью двигателя M_1 (типа ЭДП-2). Первичная обмотка двигателя подключена к электросети через конденсатор C_1, обеспечивающий сдвиг фаз между током в обмотке и напряжением сети, равный $\pi/2$. Дистанционная регулировка громкости производится установкой рукоятки громкости, расположенной на пульте дистанционного управления *ДУ*, в верхнее или нижнее положение, соответствующее большей или меньшей громкости. При этом на обмотку двигателя подается напряжение

соответствующей полярности и он перемещает движок потенциометра в направлении, обеспечивающем необходимую громкость

Электромеханические регуляторы с управлением двигателем с помощью контактов можно применять в тех случаях, когда опера

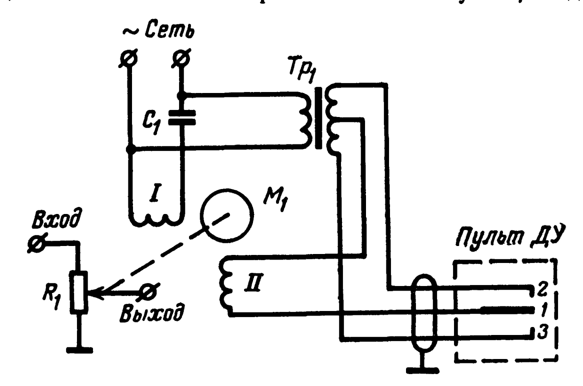


Рис. 8. Схема электромеханического регулятора усиления с контактным управлением.

тор находится в том же помещении, где установлены громкоговорители, и имеет возможность корректировать громкость на слух. При отсутствии слухового контроля для управления потенциометром R_1 применяют простейшую следящую систему (рис. 9), состоящую из

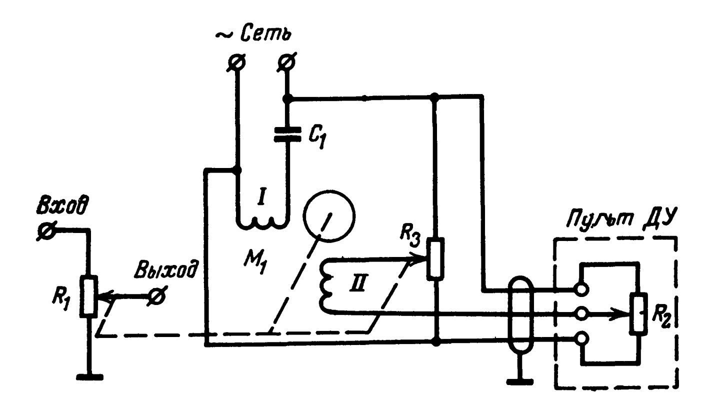


Рис. 9. Схема электромеханического регулятора усиления со следящей системой.

потенциометра-датчика R_2, исполнительного двигателя M_1 и потенциометра обратной связи R_3. Обмотка *II* включена в диагональ мостовой схемы, образованной потенциометрами R_2 и R_3. Оси потенциометров R_1 и R_3 механически сопряжены с ротором двигателя.

Если в какой-то момент времени положения движков потенциометров R_2 и R_3 неодинаковы, то между движками появляется разность потенциалов, прикладываемая к обмотке *II* двигателя. Ротор двигателя начинает поворачивать оси потенциометров R_1 и R_3 до тех пор, пока разность потенциалов между движками потенциометров не станет меньше напряжения необходимого для работы двигателя, т. е. когда положение движков потенциометров R_1 и R_3 будет примерно соответствовать положению движка потенциометра R_2.

Для автоматических регуляторов усиления используют следящую систему с усилителем, однако схема эта довольно сложна, и применять ее в радиолюбительских конструкциях нецелесообразно.

На практике электромеханические регуляторы используются редко, в основном в аппаратуре дальней связи. Объясняется это следующими недостатками регуляторов: большие размеры и вес; невысокая надежность из-за использования вращающихся и контактирующих узлов; наличие шума при работе регулятора; сложность эксплуатации, обусловленная необходимостью периодической чистки и смазки узлов регулятора.

Вместе с тем электромеханические регуляторы обладают рядом преимуществ перед имеющимися в настоящее время электронными регулируемыми усилителями. Укажем на некоторые достоинства этих регуляторов: большой диапазон регулирования, определяемый лишь параметрами примененного потенциометра; высокая точность регулировки; полное отсутствие каких-либо нелинейных, а в большинстве случаев и частотных искажений, так как сопротивление потенциометра — чисто активное и постоянное в диапазоне звуковых частот; малая восприимчивость к изменению температуры и других внешних факторов; возможность получения любой регулировочной характеристики путем использования нужного типа потенциометра; возможность идентичной регулировки одновременно несколькими сигналамн, что достигается применением в регуляторе спаренных потенциометров.

Перечисленные недостатки электромеханических регуляторов в ряде применений вполне окупаются их положительными качествами. Что же касается точности регулировки и одновременного управления несколькими переменными сигналами, то среди всех известных регулирующих устройств электромеханические регуляторы не имеют себе равных.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ

УПРАВЛЕНИЕ ПО ПЕРВОЙ СЕТКЕ

Можно приблизительно считать, что коэффициент усиления K лампового каскада при малом уровне входного сигнала и активной нагрузке равен произведению крутизны анодно-сеточной характеристики S на сопротивление резистора нагрузки $R_а$, т. е. $K=SR_а$. Поэтому изменение коэффициента усиления ламповых усилителей при неизменном $R_а$ можно свести к изменению крутизны S. Крутизна характеристики зависит от режима работы, т е. от значений напря-

жений на электродах лампы. Так, при изменении напряжения на первой сетке меняются ток, протекающий через лампу, и крутизна характеристики. Это напряжение определяет рабочую точку на характеристике лампы.

В ряде случаев изменение коэффициента усиления лампового каскада производится изменением отрицательного напряжения (напряжения смещения) на управляющей (первой) сетке лампы. Увеличение отрицательного напряжения смещения приводит к уменьшению крутизны S анодно-сеточной характеристики в рабочей точке и усилению каскада.

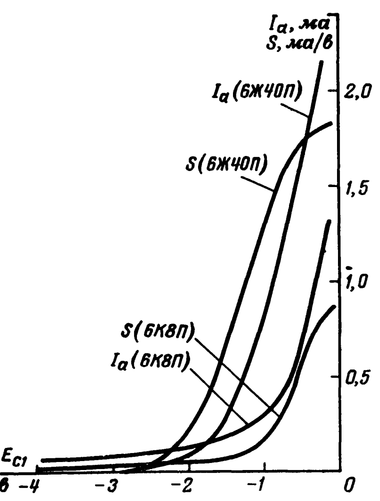


Рис. 10. Зависимость анодного тока и крутизны характеристики от напряжения на управляющей сетке для ламп 6К8П и 6Ж40П.

При больших отрицательных напряжениях на первой сетке рабочая точка попадает на криволинейный участок характеристики, поэтому возможно появление нелинейных искажений при относительно больших напряжениях сигнала. Для уменьшения нелинейных искажений, а также получения большого диапазона регулирования применяют пентоды с переменной крутизной характеристики. Эти лампы обладают удлиненной характеристикой в области отрицательных напряжений на управляющей сетке (кривая I_a для лампы 6К8П, рис. 10). Управляющая сетка в лампах с переменной крутизной имеет неравномерную намотку: бóльшая часть витков имеет малый шаг, а несколько витков в средней части сетки имеют увеличенный шаг.

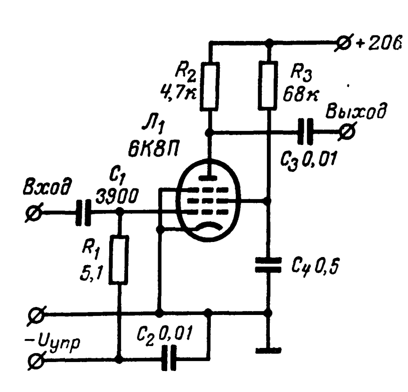


Рис. 11. Схема РУ с управлением по первой сетке.

При больших отрицательных напряжениях электронный поток проходит только через среднюю часть сетки с редкой структурой и крутизна лампы мала. С уменьшением отрицательного напряжения начинают работать все витки сетки и крутизна лампы (коэффициент усиления) возрастает.

Поскольку коэффициент усиления пропорционален крутизне лампы, регулировочная характеристика РУ будет иметь такой же вид, как и зависимость S от E_c. Для сравнения на рис. 10 показана зависимость анодного тока и крутизны характеристики

пентода 6Ж40П (с короткой характеристикой) от напряжения на управляющей сетке.

В схеме регулятора усиления с управлением по первой сетке, приведенной на рис. 11, применен пентод 6К8П, способный работать при низковольтном питании анодно-сеточных цепей. При нулевом управляющем напряжении на первой сетке лампы напряжение на аноде равно примерно 12 *в*, а на второй (экранирующей) сетке 3 *в*. Начальное автоматическое смещение создается на управляющей сетке лампы за счет падения напряжения на резисторе утечки R_1 с большим сопротивлением при прохождении через него сеточного тока.

Особенностью данной схемы является большой диапазон регулирования. Обычно в схемах РУ с управлением по первой сетке он не превышает 26—30 *дб*. В схеме же на рис. 11 при изменении управляющего напряжения от 0 до —10 *в* усиление каскада изменяется более чем на 40 *дб*. Регулировочная характеристика этого РУ имеет вид вогнутой убывающей кривой (вида *Д* на рис. 2).

УПРАВЛЕНИЕ ПО ТРЕТЬЕЙ СЕТКЕ

Анодный ток пентода зависит от напряжения на третьей (защитной) сетке. Она обычно имеет потенциал катода и препятствует попаданию на вторую (экранирующую) сетку вторичных электронов, вылетающих из анода, т. е. возникновению динатронного эффекта. Если же на нее подавать большие отрицательные напряжения (в тех

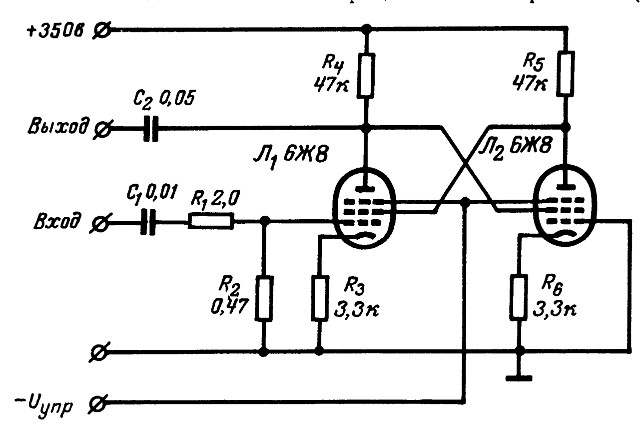


Рис. 12. Схема РУ с управлением по третьей сетке.

лампах, где она не соединена с катодом внутри лампы и имеет отдельный вывод), то можно воздействовать и на первичный электронный ток, тем самым изменяя крутизну анодно-сеточной характеристики и коэффициент усиления каскада.

Для регулировки усиления отрицательное управляющее напряжение на защитной сетке должно быть значительным. При необходимости производить регулировку небольшими отрицательными напряжениями следует применять специальные пентоды с двойным

управлением (6Ж10П, 6Ж35Б, 6Ж46Б-В) или снизить постоянное напряжение на аноде и второй сетке. Регулировочная характеристика такого РУ, например на лампе 6Ж2Б, близка к линейной возрастающей кривой (вида *Г* на рис. 2).

Схема РУ с управлением по защитной сетке приведена на рис. 12. Она интересна тем, что в ней отсутствуют искажения переходного характера — щелчки срабатывания, возникающие при резком изменении управляющего напряжения. Напомним, что для устранения таких искажений в гл. 1 рекомендовалось применять двухтактное включение двух одинаковых ламп, а на выходе этих каскадов включать общий двухтактный трансформатор. В рассматриваемой схеме устранение щелчков срабатывания удалось осуществить более простым методом — применением лампы-эквивалента $Л_2$.

Анод лампы $Л_1$ соединен со второй сеткой лампы-эквивалента $Л_2$. Поскольку управляющее напряжение приложено к третьим сеткам обеих ламп, то увеличение или уменьшение анодного тока лампы $Л_1$ уравновешивается соответственно уменьшением или увеличением тока второй сетки лампы-эквивалента $Л_2$. При изменении управляющего напряжения во всем диапазоне регулирования катодный ток лампы $Л_1$ остается постоянным

Таким образом, изменение действующего значения крутизны лампы и коэффициента усиления РУ на лампе $Л_1$ достигается без бросков тока в цепи сигнала, а значит, и без искажений переходного характера.

УПРАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЕМ НАГРУЗКИ

Во всех предыдущих случаях перемещением рабочей точки по характеристике лампы при изменении напряжений на ее электродах мы изменяли крутизну характеристики S. В результате изменялось усиление каскада в соответствии с приводимым ранее выражением $K=SR_а$. Из этого выражения видно, что воздействовать на коэффициент усиления каскада можно также изменением сопротивления нагрузки $R_а$ при неизменной крутизне S. Осуществить это удается использованием в качестве нагрузки управляемых элементов: варисторов, фоторезисторов, терморезисторов, а также электронных ламп и транзисторов

На рис. 13 показан РУ с регулировкой изменением нагрузки. Нагрузка лампы $Л_1$ — сложная: она состоит из суммарного сопротивления первичной обмотки выходного трансформатора $Тр_1$ и внутреннего сопротивления управляющей лампы $Л_2$, которая по переменному току включена параллельно первичной обмотке трансформатора.

При изменении управляющего напряжения, подаваемого на сетку лампы $Л_2$, часть нагрузки, представленная лампой $Л_2$, будет меняться по закону управляющего напряжения. При максимальном отрицательном управляющем напряжении (—20 *в*) лампа запирается и нагрузкой выходного каскада будет только выходной трансформатор, у которого сопротивление каждой половины первичной обмотки на холостом ходу составляет 15 *ком*. При нулевом управляющем напряжении через каждый триод лампы $Л_2$ протекает ток около 10 *ма* и сопротивление триода равно 6 *ком*. Тогда сопротивление нагрузки каждого триода усилительной лампы, составленное из двух параллельно соединенных сопротивлений 15 и 6 *ком*, будет равно 4,3 *ком*.

Таким образом, в процессе регулировки сопротивление нагрузки, а соответственно и коэффициент усиления каскада меняются примерно в 3,5 раза, т. е. на 11 *дб*, что достаточно для некоторых устройств, в частности для экспандеров, где и использовалась эта

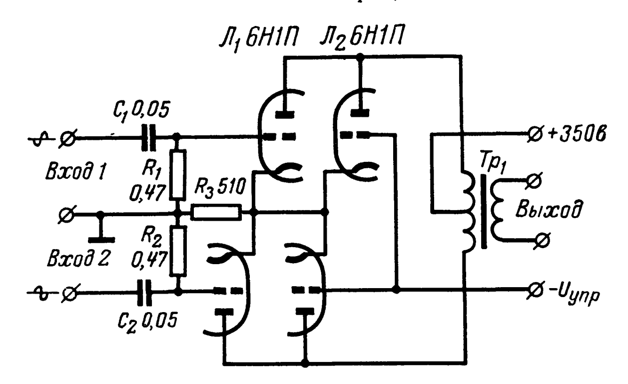


Рис. 13. Схема РУ с изменением нагрузки.

схема. Зато при амплитуде входного сигнала до 3 *в* коэффициент комбинационных искажений не превышает 1%, а коэффициент гармоник пренебрежительно мал.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА ТРАНЗИСТОРАХ

УПРАВЛЕНИЕ ПО ТОКУ ЭМИТТЕРА

Большое распространение получили усилители на транзисторах, изменяющих свое усиление за счет изменения тока эмиттера, подобно тому как усиление электронной лампы определяется постоянным напряжением на ее управляющей сетке.

Если обозначить через ν коэффициент изменения тока эмиттера, т. е.

$$\nu = \frac{I_{э.макс}}{I_{э.мин}},$$

то диапазоны изменения коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности каскада с общим эмиттером выражаются следующими соотношениями:

$$d_u = \frac{K_{u\,макс}}{K_{u\,мин}} = \nu;\; d_i = \frac{K_{i\,макс}}{K_{i\,мин}} \approx 1;\; d_p = d_u d_i = \nu.$$

Тогда диапазон регулировки РУ на транзисторе с управлением по току эмиттера можно определить по формуле

$$D=20\lg d_p=20\lg \nu.$$

Если ток эмиттера $I_э$ изменяется от 0,1 до 1 *ма*, т. е. $\nu=10$, то динамический диапазон составит 20 *дб*.

Приведенные выше формулы верны только при изменении тока эмиттера от 0,1 *ма* и выше. При токах $I_э<0{,}1$ *ма* изменение коэффициентов усиления проявляется резче, и диапазоны изменения коэффициентов усиления в этом случае определятся как

$$d_u=\nu^3;\ d_i=\nu;\ d_p=\nu^4,$$

а диапазон регулировки РУ в децибелах

$$D'=20\lg d_p=20\lg \nu^4=80\lg \nu.$$

Так, при изменении $I_э$ от 100 до 20 *мка*

$$D'=80\lg\frac{100}{20}=80\cdot 0{,}7=56\ дб.$$

Поэтому при малых токах эмиттера можно получить во много раз более глубокую регулировку усиления, чем при сравнительно больших токах эмиттера. Однако при малых токах значительно ухудшается температурная стабильность каскада и реализовать такую глубокую регулировку можно только в схемах, предназначенных для использования в аппаратуре, работающей в довольно узком диапазоне изменения температуры. Кроме того, при очень малых токах эмиттера возрастают нелинейные искажения, поскольку рабочая точка переходит на участок характеристики с большей нелинейностью.

Если в процессе регулировки меняются условия согласования каскада, то действительный диапазон регулирования РУ будет несколько меньше рассчитанного. Поэтому для учета рассогласования при определении диапазона регулирования следует использовать диапазон изменения коэффициента усиления не по мощности (d_p), а лишь по напряжению (d_u)

$$D'=20\lg d_u=20\lg \nu^3=60\lg \nu.$$

Если увеличивать ток эмиттера от 1 *ма* и выше, то окажется, что усиление каскада не только не будет расти, а наоборот, резко уменьшится. Объясняется это возрастающим влиянием напряжения на коллекторе на усилительные свойства транзистора. При увеличении тока $I_э$ напряжение на коллекторе уменьшается за счет падения напряжения на резисторе $R_к$ в соответствии с выражением

$$U_к=E_к-R_кI_к=E_к-R_кI_э\ \text{(так как } I_к\approx I_э),$$

а это приводит к понижению диапазона регулирования каскада.

Зависимость коэффициента усиления от тока эмиттера показана на рис. 14. На участке *АБ* кривой коэффициент усиления растет пропорционально увеличению тока эмиттера. Напряжение на коллекторе $U_к$ еще достаточно велико, и его изменение практически не влияет на коэффициент усиления. Изменение усиления на этом участке полностью определяется током эмиттера. На участке *БВ* кривой

влияние увеличивающегося тока $I_э$ и уменьшающегося напряжения $U_к$ на усилительные свойства каскада одинаково и противоположно, в связи с чем коэффициент усиления не изменяется. На участке *ВГ* напряжение $U_к$ становится настолько малым, что усилительные свойства каскада снижаются, несмотря на большой ток эмиттера.

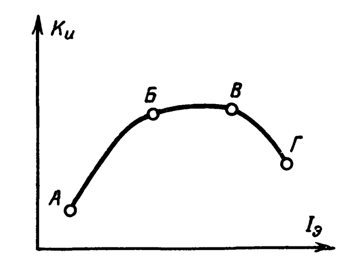


Рис. 14. Зависимость коэффициента усиления каскада с заземленным эмиттером от тока эмиттера.

Таким образом, становится возможным управлять усилением транзистора путем изменения тока эмиттера, работая на одном из двух участков: *АБ* или *ВГ*. В первом случае при увеличении тока эмиттера коэффициент усиления РУ увеличивается и его регулировочная характеристика имеет вид выпуклой возрастающей кривой (зависимость *Б*). Во втором случае увеличение коэффициента усиления происходит при уменьшении тока эмиттера от максимального до некоторого промежуточного значения. Регулировочная характеристика имеет вид выпуклой убывающей кривой (зависимость *Е*). Первую регулировку обычно называют «обратной», а вторую — «прямой».

Тот или иной вид регулировки следует выбирать исходя из требований на данную аппаратуру. Нужно иметь в виду, что мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора при самых больших эмиттерных токах, должна быть меньше наибольшей допустимой мощности для данного типа транзистора.

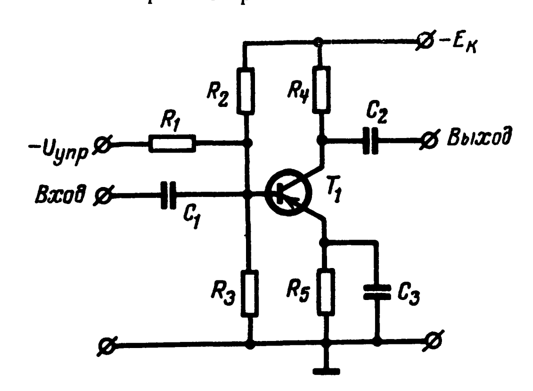


Рис. 15. Схема РУ с управлением тока эмиттера по напряжению на базе.

Управление током эмиттера можно осуществить, изменяя напряжение в цепи эмиттера или подавая управляющее напряжение на базу транзистора.

Наиболее часто в РУ используется второй способ управления током эмиттера. В схеме на рис. 15 на базу транзистора T_1 подается

отрицательное управляющее напряжение от 0 до 9 *в*. При максимальном управляющем напряжении (—9 *в*) на базе транзистора T_1 он отперт и коэффициент усиления его максимален. При уменьшении отрицательного напряжения на базе транзистора крутизна характеристики тока коллектора уменьшается и коэффициент усиления может стать меньше единицы. Диапазон регулирования этого РУ может достигать 50—60 *дб* при входном напряжении до 10 *мв*.

Поскольку ток базы транзистора, включенного с общим эмиттером, примерно в B раз меньше тока эмиттера (где B — коэффициент усиления транзистора), то нетрудно видеть, что, для того чтобы изменить ток эмиттера от $I_{э.мин}$ до $I_{э.макс}$, необходимо незначительное изменение тока базы. Это дает возможность регулировать усиление с помощью сигналов малой мощности.

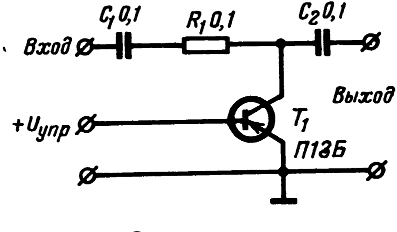


Рис. 16. Схема транзисторного управляемого делителя напряжения.

На рис. 16 приведена схема РУ, представляющего собой параллельный управляемый делитель напряжения. В качестве нижнего плеча делителя используется дифференциальное сопротивление между коллектором и эмиттером транзистора T_1 или включенные последовательно сопротивления двух полупроводниковых переходов: коллектор — база и эмиттер — база. Управляющее напряжение подводится к переходу эмиттер — база, также воздействуя на ток эмиттера. В верхнее плечо делителя включен резистор R_1. В РУ можно достигнуть диапазона регулирования более 40 *дб*, изменяя постоянное напряжение на базе всего на 200—300 *мв*.

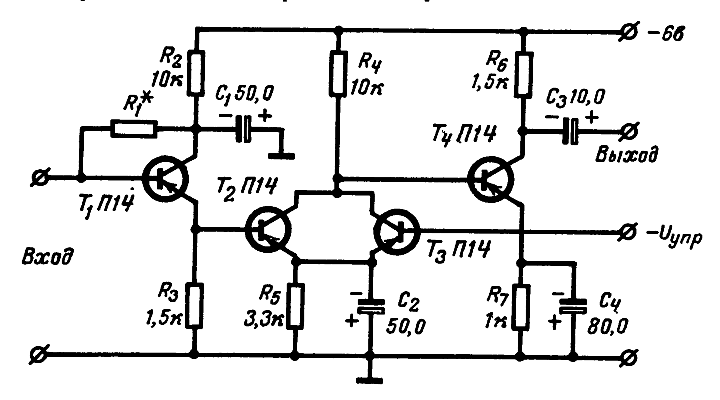


Рис. 17. Схема РУ с управлением током эмиттера.

При управлении током эмиттера изменением напряжения питания требуется большая мощность источника. Для увеличения мощности источника управляющего напряжения можно применить отдельный усилитель постоянного тока. Одна из таких схем показана

на рис 17. Изменение тока эмиттера управляемого транзистора T_2 осуществляется путем подачи на эмиттер отрицательного напряжения, падающего на резисторе R_5, включенном также в эмиттерную цепь управляющего каскада на транзисторе T_3.

На входе РУ включен эмиттерный повторитель на транзисторе T_1, а на выходе — усилительный каскад с общим эмиттером на транзисторе T_4 Связь между всеми каскадами гальваническая. Соотношения токов и напряжений в схеме выбраны такими, что при отсутствии управляющего напряжения на базе транзистора T_3 он заперт, а транзистор T_2 имеет максимальное усиление.

С увеличением отрицательного управляющего напряжения транзистор T_3 отпирается, растут ток через него и падение напряжения на резисторе R_5, что приводит к снижению коэффициента усиления транзистора T_2.

Диапазон регулирования РУ составляет 40 *дб* при изменении управляющего напряжения на 100 *мв* и входном напряжении 5—8 *мв*.

УПРАВЛЕНИЕ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА КОЛЛЕКТОРЕ

Изменение напряжения на коллекторе довольно слабо влияет на усиление транзисторного каскада. По этой причине РУ с управлением только по напряжению на коллекторе применяется редко

В РУ такого типа напряжение на базу и коллектор подводят от одного источника управляющего напряжения $U_{упр}=E_к$ Схема РУ с комбинированным управлением, в которой в качестве управляющего используется напряжение коллекторного питания, приведена на рис. 18. Если уменьшить напряжение $U_{упр}$, одновременно уменьшаются напряжение на коллекторе и ток эмиттера, и усиление каскада падает. При изменении управляющего напряжения от 0 до 15 *в* схема изменяет коэффициент усиления в 2 000 раз, т. е. на 66 *дб*, по кривой вида *В* (вогнутая возрастающая). Нелинейные искажения небольшие, но сильно возрастают при управляющем напряжении, близком к нулю: сигнал, подаваемый на вход РУ, на выходе его становится ограниченным. Поэтому для уменьшения искажений можно поступиться столь широким диапазоном регулирования и менять управляющее напряжение в меньших пределах.

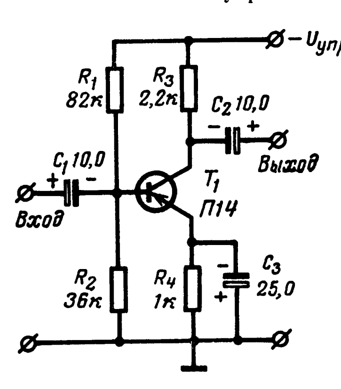


Рис. 18. Схема РУ с управлением по току эмиттера и напряжению на коллекторе.

Недостатком РУ с управлением по напряжению на коллекторе является необходимость применения источника управляющего напряжения сравнительно большой мощности, что затрудняет использование этого регулятора во многих схемах, в частности в схемах автоматической регулировки усиления. Устранить указанный недостаток можно включением в цепь коллекторного питания управляющего транзистора T_3 (рис 19), на базу которого подается управляю-

щее напряжение. При запирании этого транзистора положительным напряжением растет сопротивление между его коллектором и эмиттером, что будет вызывать уменьшение коллекторного напряжения и тока эмиттера у транзисторов T_1 и T_2. Коэффициент усиления этих транзисторов понизится. Резистор R_9 включен для стабилизации на-

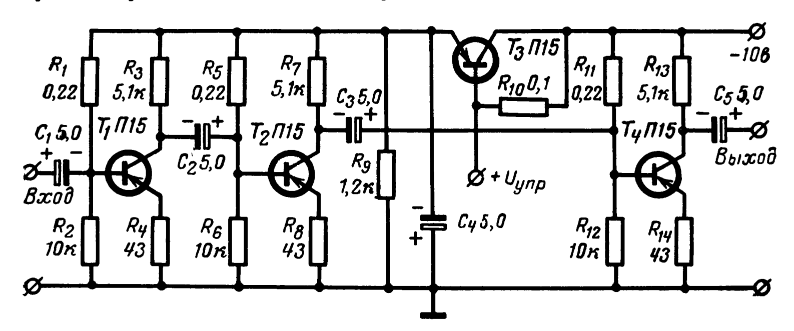


Рис. 19. Схема РУ с управлением по току эмиттера и напряжению на коллекторе с дополнительным управляющим транзистором в коллекторной цепи.

грузки управляющего транзистора T_3. Конденсатор C_4 служит для развязывания цепей по переменному току. Каскад на транзисторе T_4 — нерегулируемый.

Схема обеспечивает глубину регулировки около 40 *дб*. Коэффициент нелинейных искажений не более 2% при входном напряжении менее 10 *мв*.

УПРАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЕМ ГЛУБИНЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Иногда регулировку усиления производят изменением глубины отрицательной обратной связи. При этом составляют схемы, показанные на рис. 6,*д* и *е*, где вместо переменных резисторов включают какие-либо управляемые нелинейные элементы — диоды, лампы, транзисторы, у которых может меняться дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току) в зависимости от изменения постоянного напряжения на их электродах.

Одна из схем РУ, в которой управление усилением каскада осуществляется за счет изменения глубины отрицательной обратной связи по напряжению, показана на рис. 20. Усилительный каскад на транзисторе T_2 включен по схеме с общим эмиттером. Резистор R_1 является нагрузкой каскада. Переменное напряжение подается на базу транзисторов с зажимов *Вход* через делитель переменного напряжения, образованный сопротивлением резистора R_2 (в верхнем плече) и сопротивлениями резисторов R_5, R_6 и транзистора T_1 (в нижнем плече). Обратная связь по напряжению осуществляется с коллектора транзистора T_2 на его базу также через делитель напряжения, образованный дифференциальным сопротивлением диода $Д_1$ в верхнем плече и сопротивлениями резисторов R_5, R_6 и транзистора T_1 в нижнем плече Как видим, транзистор T_1 вместе с резисторами R_5 и R_6 работает в нижнем плече сразу двух делителей: входного и обратной связи.

Здесь еще надо учитывать входное сопротивление переменному току каскада на транзисторе T_2 (вместе с сопротивлением резистора R_8), поскольку оно включено параллельно нижнему плечу делителя и тоже будет влиять на коэффициент передачи делителя. Сопротивление резистора R_7 велико, поэтому его шунтирующим действием на диод $Д_1$ можно пренебречь.

Управляя напряжением на входе транзистора T_1, можно изменять его выходное сопротивление, а соответственно и сопротивление нижнего плеча обоих делителей, т. е. управлять коэффициентом передачи обоих делителей. С другой стороны, изменение управляющего

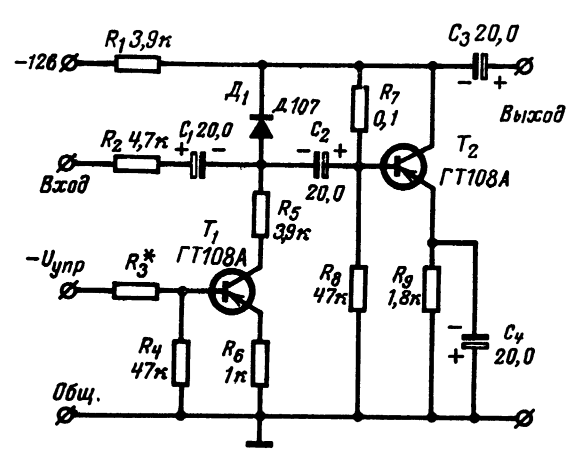


Рис. 20. Схема транзисторного РУ с изменением глубины обратной связи по напряжению.

напряжения повлечет за собой изменение коллекторного тока транзистора T_1, протекающего через диод $Д_1$ и резисторы R_1, R_5. Как будет показано в следующей главе, дифференциальное сопротивление полупроводникового диода зависит от протекающего через него постоянного тока. Поэтому в схеме будет изменяться сопротивление не только нижнего плеча делителей, но и верхнего плеча делителя напряжения обратной связи, которое образовано дифференциальным сопротивлением диода $Д_1$.

Рассмотрим случай, когда управляющее напряжение равно нулю. Коллекторный ток транзистора T_1, протекающий через диод $Д_1$, очень мал, дифференциальное сопротивление диода велико, обратная связь незначительна, и каскад на транзисторе T_2 имеет наибольший коэффициент усиления. Кроме того, сопротивление нижнего плеча для входного делителя велико по сравнению с сопротивлением резистора R_2 и на базу транзистора T_2 поступает почти все входное переменное напряжение. Таким образом, напряжение на выходе схемы максимально.

Если на базу транзистора T_1 подать отрицательное управляющее напряжение значительной величины, то уменьшится сопротивление нижнего плеча входного делителя и переменное напряжение, поступающее на базу транзистора T_2, снизится, поскольку часть его

будет уже падать на резисторе R_2 Одновременно за счет увеличения коллекторного тока транзистора T_1 резко упадет дифференциальное сопротивление диода $Д_1$, сопротивление верхнего плеча этого делителя станет много меньше сопротивления нижнего плеча, что приведет к увеличению глубины отрицательной обратной связи. При глубокой обратной связи между коллектором и базой транзистора T_2 уменьшается усиление каскада на этом транзисторе (одновременно уменьшаются нелинейные искажения выходного сигнала). Диапазон регулирования РУ превышает 50 *дб* при изменении управляющего напряжения на базе транзистора T_1 от 0 до 2 *в*.

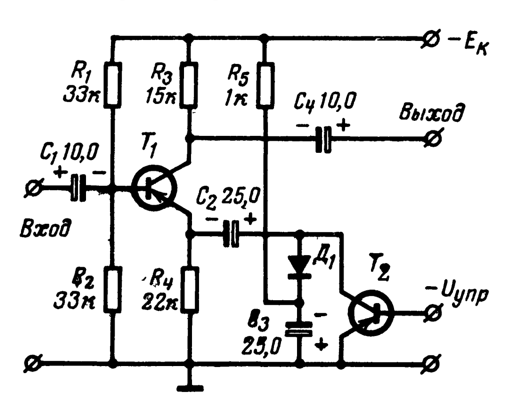


Рис. 21. Схема транзисторного РУ с изменением глубины обратной связи по току.

В радиоэлектронике находят применение схемы РУ, в которых коэффициент усиления зависит от глубины отрицательной обратной связи по току. В этих схемах в эмиттерную цепь каскада с общим эмиттером включают какой-либо управляемый элемент. Коэффициент усиления каскада изменяется обратно пропорционально изменению дифференциального сопротивления этого элемента.

Одна из схем с управлением изменением глубины обратной связи по току приведена на рис. 21. Диод $Д_1$ включен по переменному току параллельно резистору R_4, а по постоянному току — последовательно с коллекторной цепью транзистора T_2, предназначенного для уменьшения требуемой мощности источника управляющего напряжения $U_{упр}$.

В исходном состоянии схемы на базу транзистора T_2 поступает наибольшее отрицательное управляющее напряжение. Транзистор T_2 полностью отперт, ток коллектора, проходящий через диод $Д_1$, максимален, и дифференциальное сопротивление последнего мало. Малое сопротивление диода, шунтируя резистор R_4, уменьшает глубину отрицательной обратной связи по току, вследствие чего усиление каскада на транзисторе T_1 максимально.

При уменьшении управляющего напряжения на базе транзистора T_2 он начинает запираться, уменьшая ток коллектора; дифференциальное сопротивление диода $Д_1$ возрастает, что в конечном счете

приводит к увеличению отрицательной обратной связи и уменьшению усиления каскада на транзисторе T_1.

Диапазон регулировки РУ составляет 40—45 *дб* Наибольшее напряжение сигнала на входе каскада равно 250—300 *мв*. При бо́льших входных напряжениях соответственно возрастает коэффициент нелинейных искажений.

Преимуществами методов регулировки усиления путем изменения обратной связи перед другими, основанными на перемещении рабочей точки, являются малые нелинейные искажения. Кроме того, в этих схемах в процессе регулировки не происходит изменения режима электронного прибора усилительного каскада по постоянному току, и поэтому можно осуществить эффективную температурную стабилизацию каскада.

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Полевой транзистор (рис. 22,*а*) представляет собой стержень из полупроводникового материала (чаще всего с проводимостью типа *n*) с контактами на торцах, называемыми истоком *И* и стоком *С*. В узкой части стержня, располагаемой ближе к истоку, нанесен слой полупроводника другой проводимости (типа *p*), который также имеет контакт, называемый затвором *З*. Зона раздела этих полупроводников образует *p-n* переход.

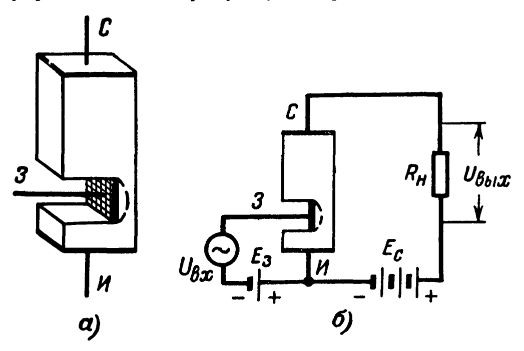


Рис. 22. Конструкция полевого транзистора и схема его включения.

Если подключить полевой транзистор к источникам внешнего постоянного напряжения, как это показано на рис. 22,*б*, то между истоком и стоком будет протекать ток, значение которого определяется приложенным напряжением и сопротивлением узкой части стержня — каналом. Действующее сечение канала меньше его геометрического сечения и зависит от приложенного к затвору напряжения.

При возрастании отрицательного напряжения на затворе увеличивается толщина так называемого запирающего слоя *p-n* перехода (штриховая линия на рис. 22,*б*) и уменьшается сечение токопроводящего канала, а сопротивление канала возрастает. При подаче

на затвор управляющего напряжения в цепи стока происходит изменение тока и с нагрузки $R_н$ снимается усиленное переменное напряжение.

Полевой транзистор довольно схож с электронной лампой, если при этом принять исток за катод лампы, сток — за анод, а затвор — за управляющую сетку. В полевом транзисторе типа *n*, как и в лампе, электроны движутся от истока (катода) к стоку (аноду). При достаточно большом отрицательном напряжении на управляющем контакте — затворе (так называемом напряжении отсечки) канал полевого транзистора может быть полностью перекрыт и ток стока станет равным нулю, что напоминает запирание лампы. Входное сопротивление полевого транзистора, как и у ламп, большое, а характеристики полевых транзисторов похожи на характеристики пентода. Все это дает основание использовать с полевыми транзисторами известные ламповые схемы и «ламповые» методы расчета этих схем.

В то же время полевые транзисторы имеют определенные преимущества перед лампами, присущие полупроводниковым приборам вообще.

Если изменять напряжение на затворе полевого транзистора $U_з$, то будет изменяться ток в цепи стока $I_с$, а соответственно и крутизна вольт-амперной характеристики $S=\Delta I_с/\Delta U_з$. Зависимость крутизны от напряжения выражается соотношением

$$S=\frac{1}{R_{к0}}\left(1-\sqrt{\frac{U_з}{U_{з0}}}\right),$$

где $R_{к0}$ — минимальное сопротивление канала при напряжении отсечки $U_{з0}$. При увеличении отрицательного напряжения на затворе крутизна характеристики уменьшается по закону, близкому к квадратичному.

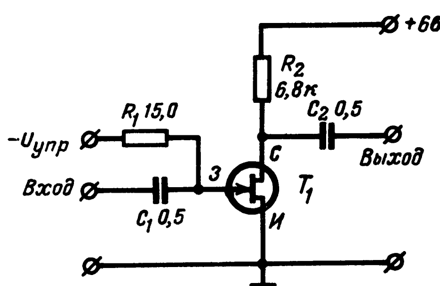


Рис. 23. Схема РУ на полевом транзисторе.

При использовании полевых транзисторов в регулируемых усилителях отрицательное управляющее напряжение подают на затвор, как это показано на рис. 23. Характеристика РУ имеет вид вогнутой убывающей кривой (зависимость *Д*). В этом РУ можно получить диапазон регулирования 35—40 *дб* при незначительных искажениях сигнала.

Полевые транзисторы можно применять и в схемах управляемых делителей напряжения, используя сопротивление канала тран-

зистора в качестве одного из плеч делителя. Одна из таких схем с диапазоном регулировки 35 *дб* на частоте 1 *кгц* приводилась, в частности, в журнале «Радио» 1965 г. № 8.

По мере выпуска новых типов полевых транзисторов регулируемые усилители на них будут получать все большее распространение, в том числе и в радиолюбительской практике.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ДРУГИМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРИБОРАМИ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ВАРИСТОРАМИ

В качестве управляемых элементов в РУ, кроме ламп и транзисторов, могут быть применены и другие полупроводниковые приборы, имеющие нелинейную зависимость тока от приложенного к ним напряжения. Одним из таких элементов является варистор, или НПС (нелинейное полупроводниковое сопротивление).

Вольт-амперная характеристика одного из типов варистора приведена на рис. 24. Как видно из графика, крутизна кривой меняется в зависимости от приложенного напряжения: она наименьшая при нулевом напряжении и наибольшая при максимальном напряжении на варисторе независимо от полярности напряжения, поскольку характеристика симметрична относительно начала координат.

Основными параметрами варистора являются сопротивление постоянному току, дифференциальное сопротивление и коэффициент нелинейности, зависящие от выбора рабочей точки.

Сопротивление постоянному току R_0 находят по отношению значений постоянного напряжения в данной точке A к току в этой же точке

$$R_0 = \frac{U}{I}.$$

Иначе сопротивление постоянному току определяют как тангенс угла наклона хорды OA, проведенной через начало координат и данную точку A, к оси ординат.

Дифференциальное сопротивление $r_д$ представляет собой отношение малого приращения напряжения ΔU на варисторе к вызвавшему это приращение изменению тока ΔI

$$r_д = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Дифференциальное сопротивление выражают как тангенс угла наклона касательной к вольт-амперной характеристике в данной точке A к оси ординат и находят поделив напряжение U' на ток I, найденные по характеристике варистора (рис. 24),

$$r_д = \frac{U'}{I}.$$

Отношение сопротивления постоянному току к дифференциальному сопротивлению характеризует коэффициент нелинейности в данной точке

$$\beta = \frac{R_0}{r_д} = \frac{U}{I} \frac{I}{U'} = \frac{U}{U'}.$$

Для линейных сопротивлений, в частности резисторов, $\beta = 1$.

Маркировка варистора состоит из букв НПС и трех чисел, например: НПС-20-1,5-3. Числа обозначают максимальное рабочее напряжение в вольтах ($U_{макс} = 20$ *в*), ток в миллиамперах ($I_{макс} = 1{,}5$ *ма*) и коэффициент нелинейности β ($\beta = 3$), соответствующие рабочей точке при указанном напряжении $U_{макс}$. Отсюда можно найти сопротивления варистора:

$$R_0 = \frac{U_{макс}}{I_{макс}} = \frac{20}{1{,}5 \cdot 10^{-3}} = 13{,}3 \text{ ком};$$

$$r_д = r_{мин} = \frac{R_0}{\beta} = \frac{13{,}3}{3} = 4{,}45 \text{ ком}.$$

В схемах РУ варистор составляет одно из плеч управляемого делителя напряжения, включенного в цепь переменного сигнала. Изменение переменного напряжения на выходе делителя осуществляется за счет изменения постоянного управляющего напряжения, также прикладываемого к выводам варистора. В этом случае управляющее напряжение соответствует напряжению U, входящему в приведенные выше формулы, а амплитуда усиливаемого сигнала соответствует ΔU. Сопротивление R_0 используется для расчета цепи постоянного управляющего напряжения, а сопротивление $r_д$ — для расчета цепи сигнала.

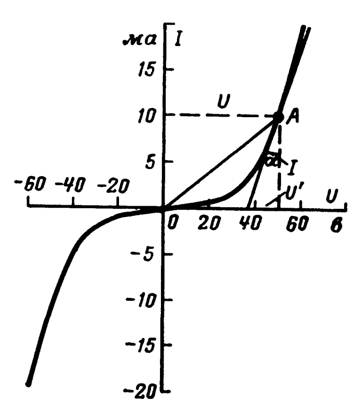


Рис. 24. Вольт-амперная характеристика варистора.

Диапазон регулирования РУ, имеющих управляемые делители напряжения, определяется, как указывалось в гл. 1, относительным изменением дифференциального сопротивления r нелинейного элемента, точнее — диапазоном его изменения q. Дифференциальное сопротивление $r_д$ варистора также зависит от приложенного к нему управляющего напряжения U. При вогнутой кривой значение сопротивления R_0 всегда больше $r_д$.

С увеличением управляющего напряжения U сопротивление R_0 растет, а $r_д$ падает, что приводит к увеличению коэффициента нелинейности β. Таким образом, изменение β может характеризовать в некоторой степени относительное изменение дифференциального сопротивления q, а значит, и диапазон регулирования. Для получения большого диапазона регулирования следует выбирать варистор с наибольшим коэффициентом нелинейности β, а значение управляющего напряжения следует брать близким к максимальному рабочему напряжению, указываемому в маркировке варистора.

В схеме на рис. 25,*а* варистор включен в верхнее плечо делителя напряжения, а в нижнем плече используется резистор R_2. О выборе сопротивления постоянного резистора говорилось в гл. 1, когда мы рассматривали последовательные управляемые делители напряжения. Конденсаторы C_1, C_2 и резистор R_1 служат для развязывания цепей по постоянному и переменному току.

Сопротивление резистора R_1 определяется соотношением

$$R_1 = \frac{U_{\text{упр}} - U_{\text{макс}} - I_{\text{макс}} R_2}{I_{\text{макс}}}.$$

В то же время оно не должно быть слишком малым, чтобы не шунтировать нагрузку предыдущего каскада. При большом R_1 необ-

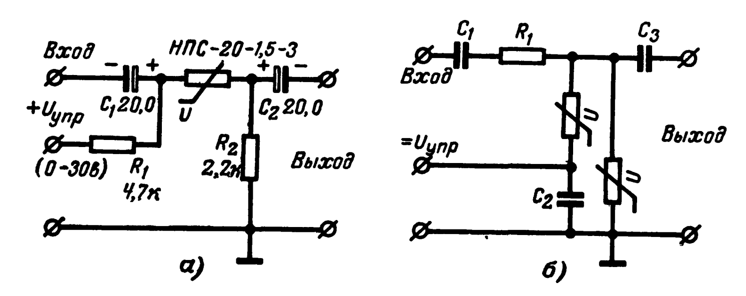


Рис. 25. Схемы делителей напряжения на варисторах.

ходимо увеличивать максимальное значение управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$, иначе на резисторе R_1 будет падать большое напряжение и ограничится диапазон регулирования схемы из-за уменьшения используемой части характеристики варистора. Если по какой-либо причине увеличить управляющее напряжение не представляется возможным, то придется заменить резистор R_1 дросселем, представляющим малое сопротивление для постоянного тока и большое для переменного. Диапазон регулирования РУ с делителем по схеме на рис. 25,*а* равен 35 *дб*.

Если имеются два варистора с одинаковыми параметрами, то их можно включить так, как это показано на рис 25,*б*, т. е последовательно по постоянному току и параллельно по переменному току. Наибольшее управляющее напряжение в этой схеме должно быть равно сумме значений максимальных рабочих напряжений каждого варистора.

Как указывалось выше, диапазон регулирования сильно зависит от максимального коэффициента нелинейности β примененного типа варистора. Так, для схемы на рис. 25,*б*

$$D = 20 \lg 0{,}5\beta e^{2(\beta-1)}$$

при значениях $R_1 = 2r_д$. При $\beta=2$ $D=17{,}5$ *дб*, при $\beta=4$ $D=58$ *дб*, а при $\beta=6$ $D=96$ *дб*, хотя при малой подключаемой нагрузке (входное сопротивление следующего каскада) он может несколько уменьшиться.

Следует иметь в виду, что дифференциальное сопротивление варистора зависит не только от постоянного управляющего напряжения, но и от амплитуды переменного напряжения сигнала, если она соизмерима с управляющим напряжением. При большой амплитуде сигнала коэффициент усиления РУ будет уменьшаться, что приведет к появлению нелинейных искажений. Поэтому для их исключения подаваемое на вход РУ переменное напряжение должно быть как можно меньшим.

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДИОДАМИ

Возможность использования полупроводниковых диодов для управления усилением в высококачественных звуковоспроизводящих установках подчас вызывает удивление радиолюбителей, поскольку среди них бытует представление о диоде как об элементе, проводящем ток в одном направлении и не проводящем в другом. Это было бы справедливо, если бы диод имел бесконечно большое обратное сопротивление и бесконечно малое прямое, причем они переходили бы одно в другое резко, скачком, как это имеет место, например, в ламповых диодах.

На самом же деле сопротивление полупроводникового диода от максимального до минимального значения изменяется плавно и зависит от величины и полярности приложенного к нему напряжения. При больших положительных напряжениях оно составляет единицы ома, при уменьшении напряжения оно постепенно растет, становясь максимальным при больших отрицательных напряжениях на аноде диода.

На рис. 26,*а* представлена типовая вольт-амперная характеристика полупроводникового диода. Сравнение ее с вольт-амперной характеристикой варистора показывает, что характеристика диода в области положительных напряжений схожа с характеристикой варистора. При изменении напряжения на диоде в этой области его сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление изменяются почти так же, как и у варистора. Но в отличие от последнего изменение сопротивлений диода зависит от полярности приложенного напряжения. При подаче на диод отрицательного напряжения, т. е. при переходе рабочей точки в левую область характеристики диода, его дифференциальное сопротивление возрастает на несколько порядков, как это показано на рис. 26,*б*.

Напряжение сигнала, подаваемое на диод, должно быть очень небольшим. Тогда и нелинейные искажения сигнала будут небольшими (рис. 26,*а*). При значительных напряжениях сигнала наступает ограничение амплитуды сигнала, сопровождающееся появлением больших нелинейных искажений. Если сигнал, подаваемый на диод, модулирован по амплитуде, то в этом случае будет наблюдаться детектирование этого сигнала и искажения сигнала будут более сложными.

В РУ полупроводниковые диоды используются как в верхнем, так и нижнем плечах управляемого делителя напряжения. Поскольку нагрузкой делителя служит, как правило, невысокое входное сопротивление транзисторного каскада, для работы в делителе следует выбирать полупроводниковые диоды, имеющие минимальное сопротивление в прямом направлении $r_{мин}$. В то же время для получения

более глубокой регулировки отношение $q=r_{макс}/r_{мин}$ должно быть большим.

Наибольшее изменение дифференциального сопротивления диода наблюдается при изменении напряжения от минус 5—10 до плюс 0,5—1,0 *в*. Например, у диодов Д9 при изменении приложенного напряжения в указанных пределах q равно 1 500—2 000.

На рис. 27,*а* приведена схема РУ с опорным диодом (стабилитрон) типа Д808 в цепи управления. Резистор R_1 и диод $Д_1$ образуют параллельный управляемый делитель напряжения. Усилитель собран на малошумящем транзисторе T_1. Уменьшение уровня сигнала на выходе осуществляется подачей положительного постоянного управляющего напряжения на диод $Д_1$, в результате чего перемещается рабочая точка на характеристике диода, дифференциальное сопротивление его уменьшается и напряжение, подаваемое на вход усилительного каскада, понижается.

Входное сопротивление усилительного каскада, являющегося нагрузкой диода $Д_1$, должно быть во много раз больше максимального дифференциального сопротивления запертого диода, иначе диапазон регулирования схемы будет малым. Это условие выполняется

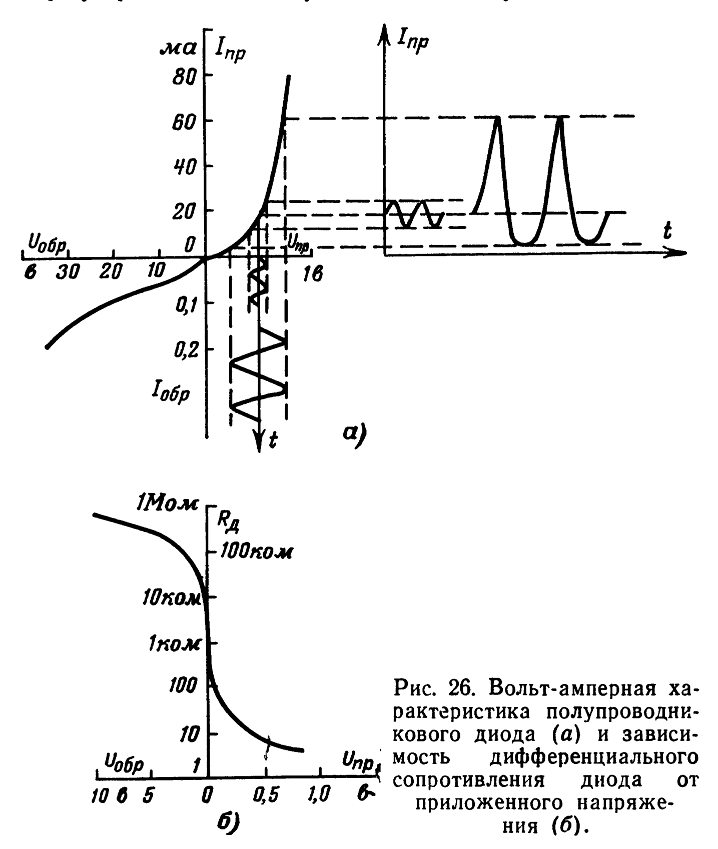


Рис. 26. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода (*а*) и зависимость дифференциального сопротивления диода от приложенного напряжения (*б*).

в ламповых схемах, имеющих большое входное сопротивление в диапазоне звуковых частот. При использовании транзисторов в усилительном каскаде приходится повышать входное сопротивление увеличением сопротивления резистора в цепи эмиттера, либо вводить между диодным делителем напряжения и усилительным каскадом эмиттерный повторитель, или же просто включать между ними резистор, как это показано на рис. 27,*а* (резистор R_3). Однако в любом из этих случаев амплитуда переменного сигнала, поступающего на транзистор, будет уменьшена.

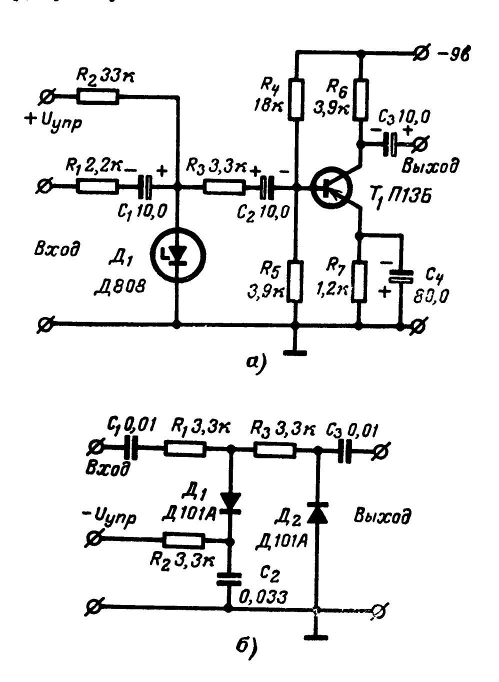


Рис. 27. Схема РУ со стабилитроном и двухзвенный параллельный делитель напряжения с диодами.

Диапазон регулирования РУ составляет 35—40 *дб* при изменении управляющего напряжения от 0 до 10—12 *в*, характеристика регулирования—линейная возрастающая (вида *А*). Коэффициент нелинейных искажений равен 3—5%, если на вход схемы подавать сигнал напряжением не более 0,5 *в*.

Большие нелинейные искажения описанного РУ объясняются тем, что дифференциальное сопротивление диода зависит не только от управляющего напряжения, но и от напряжения сигнала: при положительных полуволнах сопротивление диода меньше, чем при отрицательных. Уменьшить коэффициент нелинейных искажений можно, используя в делителе два диода (рис. 27,*б*). В этой схеме коэффициент передачи делителя одинаков как для положительных, так и

для отрицательных полуволн переменного сигнала. По цепи управления диоды включены последовательно.

Коэффициент нелинейных искажений РУ с таким делителем равен 0,1% при входном напряжении 0,5 *в*; диапазон регулировки равен 35—40 *дб*, что соответствует изменению управляющего тока от 0 до 100 *мка*. Применение кремниевых диодов позволило получить высокую температурную стабильность схемы.

Другой способ включения диодов в РУ — по последовательной схеме делителя напряжения. Схема РУ на рис. 28 содержит два звена управляемого делителя напряжения. Здесь в верхних плечах обоих делителей включены диоды $Д_1$ и $Д_2$, а в нижнем плече используются резистор R_3 (для первого звена) и включенные параллельно резистор R_4 и входное сопротивление каскада на транзисторе T_1

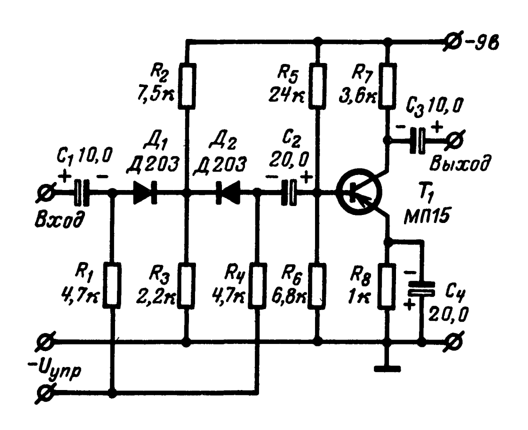


Рис. 28. Схема двухзвенного последовательного делителя напряжения с диодами.

(для второго звена), которое в процессе регулировки не изменяется.

Сопротивления резисторов R_2 и R_3 выбирают таким образом, чтобы при отсутствии управляющего напряжения за счет протекающего через диоды $Д_1$ и $Д_2$ тока около 100 *мка* их дифференциальное сопротивление было мало и сигнал на выходе делителя, а следовательно, и усилителя максимален. При подаче на диоды отрицательного управляющего напряжения — $U_{упр}$ дифференциальное сопротивление диодов резко возрастает и напряжение сигнала на выходе РУ становится минимальным. При изменении управляющего напряжения от 0 до —4,5 *в* диапазон регулирования этой схемы составляет 75 *дб*.

В настоящее время разработано множество схем регулируемых усилителей, в которых диоды включены самыми различными способами — смешанно, Г-, П- и Т-образно, по двухтактным и мостовым схемам и др. Это позволяет получать большое разнообразие РУ с различными диапазонами и характеристиками регулирования, коэффициентами усиления и температурной стабильностью.

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ТЕРМОРЕЗИСТОРАМИ

Терморезисторы (термисторы, термосопротивления) представляют собой объемные полупроводниковые резисторы, сопротивление которых уменьшается при увеличении температуры Различают терморезисторы с прямым и с косвенным подогревом. У первых изменение сопротивления происходит за счет нагрева терморезисторов от тепловой энергии, выделяемой протекающим через них током, а у вторых — от тепла вспомогательного подогревателя — отдельной обмотки, заключенной вместе с телом терморезистора в общий баллон.

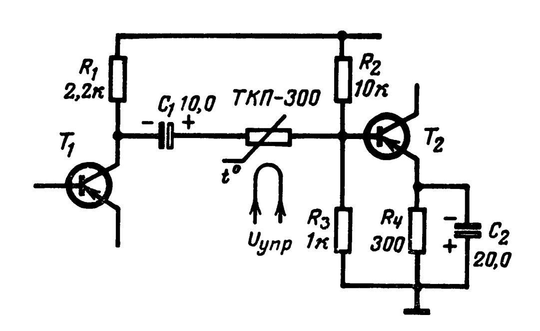


Рис. 29. Схема РУ с терморезистором с косвенным подогревом.

В РУ могут применяться оба вида терморезисторов. При использовании терморезистора прямого накала на него подают одновременно как постоянное управляющее напряжение, так и переменное напряжение сигнала. При увеличении управляющего напряжения возрастают ток через терморезистор и его температура; сопротивление терморезистора увеличивается, влияя на коэффициент усиления РУ. Схемы включения терморезисторов прямого накала в цепи постоянного и переменного тока такие же, как и в РУ с диодами и варисторами.

В схеме РУ с терморезистором с косвенным подогревом (рис. 29) он служит одним из плеч управляемого делителя. Управляющее напряжение подается на подогревную обмотку терморезистора. При изменении управляющего напряжения изменяется ток подогрева, вызывая изменение сопротивления терморезистора, а соответственно и коэффициента усиления РУ. Регулировочная характеристика РУ имеет вид вогнутой убывающей кривой. Диапазон регулирования его невелик (до 30 *дб*). Особенностью таких РУ является то, что здесь управляющая цепь полностью изолирована от сигнальной, поскольку управляющее напряжение подводится к подогревателю, а напряжение сигнала — к терморезистору, которые электрически не соединены между собой. Это дает возможность прокладывать цепь управляющего напряжения вблизи сильных переменных полей, не опасаясь появления фона в сигнальной цепи в результате наводок этих полей на цепь управляющего сигнала, и даже использовать в качестве управляющего переменное напряжение.

Следует иметь в виду, что рассматриваемый РУ обладает большой инерционностью, так как постоянная времени терморезистора довольно высока (до 15 *сек*), поэтому им можно управлять только очень медленно изменяющимися сигналами.

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ФОТОРЕЗИСТОРАМИ

В одно из плеч управляемого делителя напряжения можно включить фоторезистор (рис. 30), сопротивление которого зависит от его освещенности. При изменении напряжения питания лампочки, размещаемой вблизи фоторезистора, меняется его освещенность, что приводит к изменению сопротивления фоторезистора и коэффициента усиления РУ.

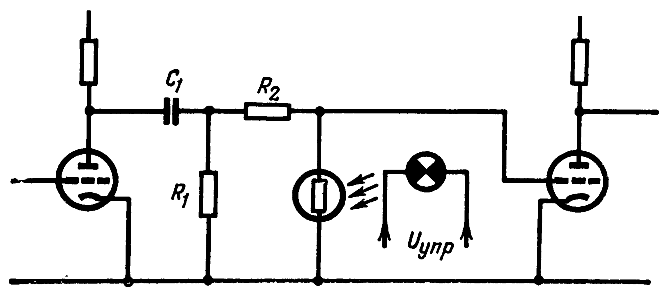


Рис. 30. Схема РУ с фоторезистором.

Фоторезисторы характеризуются рядом параметров, из которых нас будут интересовать следующие:

темновое $R_т$ и световое $R_{св}$ сопротивления — сопротивления соответственно неосвещенного и освещенного фоторезистора;

темновой $I_т$ и световой $I_{св}$ токи — токи, текущие в цепи фоторезистора соответственно при отсутствии и наличии света;

фототок $I_ф$ — приращение тока в цепи фоторезистора, происходящее при его освещении, $I_ф = I_{св} - I_т$;

кратность изменения сопротивления $R_т/R_{св}$ — отношение темнового сопротивления к световому;

инерционность — скорость реакции фоторезистора на воздействие светового потока.

Основными характеристиками фоторезисторов являются вольт-амперная и люкс-амперная характеристики. Вольт-амперная характеристика представляет собой зависимость светового и темнового токов от приложенного к фоторезистору напряжения. Эта характеристика почти для всех фоторезисторов линейна. Под люкс-амперной характеристикой подразумевают зависимость светового тока от освещенности. Она имеет нелинейный характер. На рис. 31,*а* приведено семейство люкс-амперных характеристик фоторезистора ФСК-П1 для различных напряжений, приложенных к фоторезистору.

При расчетах регуляторов усиления удобнее пользоваться зависимостью светового сопротивления от освещенности (рис. 31,*б*). От наклона этой кривой зависит диапазон регулирования РУ с этим фоторезистором, а характер кривой (т. е. ее выпуклость) с учетом

световой характеристики лампы накаливания определяет характеристику РУ.

Управляемый делитель напряжения с фоторезистором рассчитывают следующим образом. Находят изменение сопротивления нижнего (параллельного) плеча делителя с учетом сопротивления нагрузки делителя $R_н$, в частности входного сопротивления каскада, подключенного к делителю,

$$r_{мин} = \frac{R_{св} R_н}{R_{св} + R_н};$$

$$r_{макс} = \frac{R_т R_н}{R_т + R_н}.$$

Вычисляют отношение

$$q = \frac{r_{макс}}{r_{мин}} = \frac{R_т}{R_{св}} \frac{R_{св} + R_н}{R_т + R_н}.$$

Это отношение должно превышать заданный диапазон регулирования РУ в относительных единицах d, который находят по значению

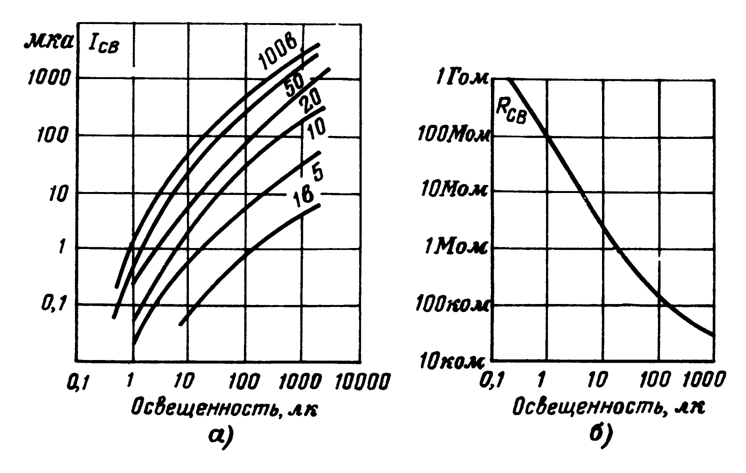


Рис. 31. Люкс-амперные характеристики фоторезистора (*а*) и зависимость светового сопротивления фоторезистора от освещенности (*б*).

диапазона регулирования, выраженного в децибелах, по следующей формуле:

$$d = 10^{D/20}.$$

Таким образом, проверяют неравенство $q > d$. При невыполнении неравенства следует увеличить входное сопротивление усилительного каскада или же заменить выбранный фоторезистор на другой, имеющий большее значение кратности сопротивления $R_т/R_{св}$.

По требуемому диапазону регулирования d вычисляют сопротивление в верхнем плече делителя (R_2 по схеме на рис 30)

$$R_2 = \frac{r_{\text{макс}}}{\frac{q}{d} - 1}.$$

При выборе сопротивления резистора R_2 следует также руководствоваться указаниями, приведенными в параграфе о характеристиках регулирования.

Входное сопротивление РУ будет меняться от $r_{\text{мин}}+R_2$ до $r_{\text{макс}}+R_2$, т. е. кратность его изменения будет равна:

$$\rho = \frac{r_{\text{макс}} + R_2}{r_{\text{мин}} + R_2}.$$

Большое изменение входного сопротивления РУ в процессе регулировки может подчас отрицательно сказываться на работе предыдущего каскада, для которого входное сопротивление РУ будет являться нагрузкой. Результатом этого воздействия может быть изменение его коэффициента усиления, частотной характеристики и т. д. Для уменьшения предела изменения входного сопротивления РУ на вход его подключают резистор R_1, сопротивление которого находят из выражения

$$R_1 = \frac{(r_{\text{мин}} + R_2)\, R_{\text{вх.мин}}}{r_{\text{мин}} + R_2 - R_{\text{вх.мин}}},$$

где $R_{\text{вх мин}}$ — наименьшее значение входного сопротивления РУ, допустимое для нормальной работы предыдущего каскада.

Наибольшее значение входного сопротивления РУ, получаемое в процессе регулирования, равно.

$$R_{\text{вх.макс}} = \frac{\rho R_1 R_{\text{вх.мин}}}{R_1 + \rho R_{\text{вх.мин}}}.$$

Фоторезистор можно включать как в нижнее, так и в верхнее плечо делителя напряжения. В первом случае мы получаем РУ с характеристикой вида *Б* (выпуклая возрастающая кривая), а во втором — вида *Д* (вогнутая убывающая кривая). Диапазон регулирования схемы в зависимости от параметров примененного фоторезистора может достигать 60 *дб* и более Так же как и в РУ с терморезистором, в данной схеме цепь управления (с лампой накаливания) полностью изолирована от цепи сигнала, что исключает попадание в нее каких-либо наводок из цепи управления.

Особенностью РУ с фоторезистором является линейность вольтамперной характеристики регулирующего элемента (сопротивление его не зависит от приложенного к нему напряжения), поэтому РУ не вносит никаких нелинейных искажений.

Недостатком РУ с фоторезистором является зависимость параметров фоторезистора от температуры окружающей среды. Так, при увеличении температуры на 20° С кратность изменения сопротивления, определяющая диапазон регулирования РУ, уменьшается примерно на 20—30%. Другим крупным недостатком такого РУ является боль-

шой ток, потребляемый управляющей цепью (лампой накаливания).

Для питания электрической лампочки в схеме на рис. 30 используется переменное напряжение. Однако, как показали испытания, это не вызывает появления фона в звуковом сигнале, что объясняется значительной тепловой инерционностью лампочки и фоторезистора.

Хотя тепло, выделяемое лампой при нормальной работе, очень мало́, желательно все-таки не оставлять регулятор продолжительное время в положении, соответствующем максимальной яркости лампы.

РЕГУЛИРУЕМЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА И МАГНИТОРЕЗИСТОРАМИ

В качестве управляющих элементов в РУ могут быть с успехом применены такие полупроводниковые элементы как датчики Холла и магниторезисторы. Принцип их действия основан на гальваномагнитных явлениях в полупроводниках — эффекте Холла и магниторезистивном эффекте.

Эффект Холла заключается в следующем. Если пластинку из полупроводника (рис. 32) поместить в магнитное поле напряженностью H и пропустить через нее ток I, то в направлении, перпен-

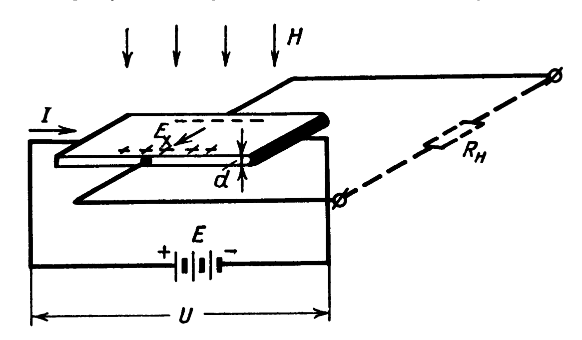


Рис. 32. К пояснению эффекта Холла.

дикулярном полю, возникнет э. д. с E_X (э. д. с. Холла), которая равна

$$E_X = \frac{R_X}{d} IH,$$

где R_X — постоянная Холла, определяемая свойствами полупроводника;

d — толщина пластинки.

Для увеличения э. д с. Холла толщина пластинки, как видно из формулы, должна быть возможно меньше. Поэтому датчик Холла представляет собой тонкую прямоугольную пластинку или пленку, изготовленную из полупроводника с высокой подвижностью носителей, в качестве которого используется мышьяковистый или сурьмянистый индий. Датчик снабжен четырьмя электродами, два из кото-

рых включаются в цепь питания, а два других служат для съема э. д. с., как показано на рис. 32.

Датчик помещают в поле постоянного магнита или электромагнита. Для сердечника электромагнита чаще всего используют ферритовый сердечник тороидальной или Ш-образной формы. В первом случае датчик Холла помещают в зазор (в разрез) тороида, а во втором он может быть наклеен непосредственно на торец средней части сердечника.

Поскольку напряжение U_X, снимаемое с датчика, зависит от тока в цепи датчика и напряженности магнитного поля, то можно воздействовать на это напряжение, изменяя I или H. При использовании датчика Холла в РУ можно напряжение сигнала подавать на один

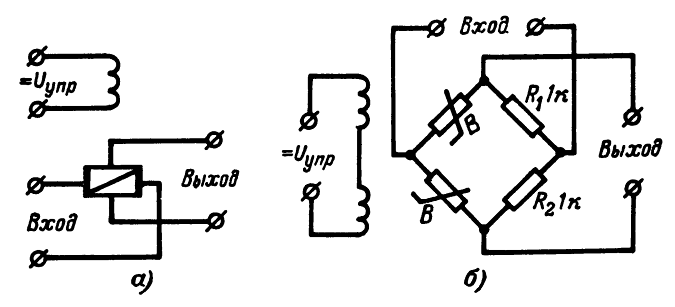


Рис. 33. Управляющие цепи РУ с датчиком Холла (*а*) и магниторезисторами (*б*).

«вход» датчика Холла (на токовые электроды пластинки вместо напряжения U или на обмотку электромагнита), а управляющее напряжение — соответственно на другой.

На рис. 33,*а* показана схема управляющей цепи РУ с датчиком Холла. Входной сигнал поступает в токовую цепь датчика, а постоянное управляющее напряжение подается на обмотку электромагнита. Напряжение на выходе цепи зависит от тока в обмотке электромагнита; иными словами, изменение коэффициента передачи этой цепи достигается изменением управляющего напряжения. Диапазон регулирования РУ с датчиком Холла очень большой, так как остаточное напряжение (напряжение на выходе управляющей цепи при нулевом управляющем напряжении) здесь крайне незначительно.

Принцип действия магниторезисторов основан на магниторезистивном эффекте (эффекте Гаусса), заключающемся в изменении сопротивления полупроводника при изменении магнитного поля. Магниторезистор — это полупроводниковый резистор с большой подвижностью носителей тока (электронов), помещенный в магнитное поле электромагнита.

Относительное изменение сопротивления магниторезистора выражается соотношением

$$\gamma = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = aH^2,$$

где ρ_0 — сопротивление магниторезистора при отсутствии магнитного поля ($\rho_0 = r_{\text{макс}}$);

a — коэффициент пропорциональности;

$\Delta\rho$ — изменение сопротивления при действии магнитного поля,

$$\Delta\rho = r_{\text{макс}} - r_{\text{мин}}.$$

Коэффициент изменения сопротивления

$$q = \frac{r_{\text{макс}}}{r_{\text{мин}}} = \frac{1}{1-\alpha} = \frac{1}{1-aH^2}.$$

Магниторезисторы используют в управляемых делителях напряжения.

В схеме на рис. 33,*б* магниторезисторы вместе с постоянными резисторами R_1 и R_2 образуют плечи моста. Постоянное управляющее напряжение подается на обмотку электромагнита, а напряжение сигнала — в одну из диагоналей моста. Магниторезисторы включены таким образом, что при изменении магнитного потока сопротивление одного из них увеличивается, а другого — уменьшается; происходит разбаланс моста и изменяется переменное напряжение на выходе схемы. При разбалансе выходное напряжение максимально.

Зависимость выходного напряжения от управляющего в этой схеме линейна, причем регулировочную характеристику можно получить как возрастающую (вида *А*), так и убывающую (вида *Г*). Это зависит от того, при каком управляющем напряжении — минимальном или максимальном — наступает равновесие моста, и достигается соответствующим выбором соотношения сопротивлений резисторов R_1 и R_2.

Диапазон регулирования РУ с магниторезисторами определяется степенью изменения сопротивления магниторезистора. Существуют магниторезисторы, сопротивления которых изменяются в сотни и тысячи раз при изменении магнитного поля от нуля до 10 *кгс*. При использовании этих магниторезисторов в РУ диапазон регулирования достигает 60 *дб*.

Преимуществом РУ с магниторезисторами в цепях управления является то, что магниторезисторы, имеющие, как и обычные резисторы, линейную вольт-амперную характеристику, не вносят нелинейных искажений даже при больших сигналах на входе РУ.

Существенным недостатком датчиков Холла и магниторезисторов является большая погрешность в их работе, обусловленная влиянием температуры и другими причинами. Впрочем для преодоления этого недостатка предложено множество технологических, конструктивных и схемных решений.

Регулируемые усилители с датчиками Холла и магниторезисторами по сравнению с другими описанными РУ более дороги и сложны. Над улучшением датчиков Холла и магниторезисторов работают ученые ряда стран, и в ближайшем будущем можно ожидать появления более совершенных магнитогальванических элементов. Однако уже сейчас РУ с датчиками Холла и магниторезисторами незаменимы при регулировке усиления в созданных в последнее время магнитогальванических усилителях низкой частоты, выполненных целиком на магниторезисторах и имеющих уровень собственных шумов значительно меньший, чем в транзисторных и ламповых усилителях.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

ИЗМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА СИГНАЛА

Качество звукового воспроизведения зависит наряду с другими характеристиками и от динамического диапазона сигнала. Под динамическим диапазоном сигнала понимают отношение максимального напряжения (или мощности) звукового сигнала к минимальному. Динамический диапазон обычно выражают в децибелах

$$D = 20 \lg \frac{U_{макс}}{U_{мин}}.$$

В акустике для оценки интенсивности звуковых сигналов используют не напряжения, а абсолютные уровни громкости звука в децибелах. В этом случае громкость звука отсчитывается от той наименьшей силы звука, при которой ухо начинает ощущать звук, т. е от порога чувствительности человеческого уха. При громкости звука 20 *дб*, например, напряжение звукового сигнала в 10 раз больше напряжения сигнала, соответствующего порогу чувствительности уха.

Динамический диапазон сигнала находится как разность наибольшего и наименьшего уровней громкости сигналов, выраженных в децибелах Он зависит от характера музыкального произведения и от особенностей исполнения. Так, речь диктора, читающего последние известия, имеет динамический диапазон 25—30 *дб* (что соответствует изменению напряжения примерно в 20 раз), а при чтении художественного произведения может достигать 50 *дб* (в 300 раз), изменяясь от криков до шепота.

Динамический диапазон передачи большинства музыкальных произведений (вокальных и струнных ансамблей, небольших оркестров) составляет обычно 40—50 *дб*, а динамический диапазон симфонического оркестра достигает 70—80 *дб*.

Воспроизвести такой большой динамический диапазон довольно трудно. Минимальный уровень воспроизводимого сигнала должен лежать примерно на 10—15 *дб* выше уровня шумов, в частности шума помещения. Обычно уровень шумов жилого помещения составляет 30—40 *дб*. Если бы надо было передать весь натуральный динамический диапазон передачи, то минимальный уровень сигнала должен быть 50 *дб*, а максимальный (при передаче оркестра) 130 *дб*. Такой уровень громкости не может восприниматься слушателем, поскольку уровень «болевого порога» человеческого уха равен 120 *дб*. Кроме того, установлено, что для надежной звукоизоляции помещений максимальный уровень передачи не должен превышать 80 *дб*. Поэтому на радиовещании приходится искусственно снижать динамический диапазон до 40 *дб*, при этом максимальному уровню сигнала будет соответствовать 80 *дб*, а минимальному 40 *дб*.

Сжатие динамического диапазона производится с помощью ручных регуляторов усиления звукорежиссером-тонмейстером, либо автоматически с помощью компрессоров, в состав которых входят регулируемые усилители

Компрессор представляет собой устройство, уменьшающее свой коэффициент усиления при увеличении уровня входного сигнала Если у обычных усилителей коэффициент усиления постоянен, а амплитудная характеристика имеет вид кривой *а* (рис. 34), то у компрессора коэффициент передачи падает с возрастанием уровня сигнала. Зависимость напряжения на выходе компрессора от напряжения на его входе изображается кривой *б* на рис. 34.

В компрессоре слабые сигналы усиливаются больше, нежели средние, громкие же не усиливаются вовсе или усиливаются незначительно. В результате происходит относительное повышение среднего уровня сигнала и помехи слабее воздействуют на тракт передачи. При наличии больших помех на линии передачи или повышенного уровня шума в помещении, где прослушивается передача, идут на гораздо большее, чем в радиовещании, сокращение динамического диапазона, вплоть до 20 *дб*. Таким образом, применение компрессора позволяет улучшить разборчивость передачи, поэтому он широко используется, например, в системах звукоусиления и в технике проводного вещания.

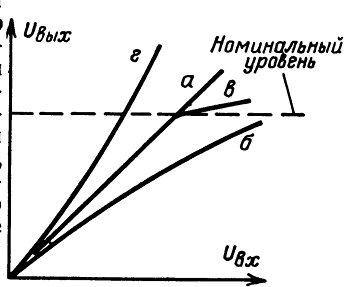


Рис. 34. Зависимость выходного напряжения от входного для усилителя (*а*), компрессора (*б*), ограничителя максимальных уровней (*в*) и экспандера (*г*).

Если мы прослушаем музыкальную программу с сильным компрессированием, то не ощутим привычного для нашего слуха соотношения между громкими и тихими звуками. Музыка будет звучать плоско и ровно, как в исполнении посредственного пианиста.

Поэтому при воспроизведении восстанавливают прежний динамический диапазон с помощью экспандера, включаемого в приемном тракте. Экспандер представляет собой устройство, коэффициент усиления которого возрастает с увеличением уровня входного сигнала. Амплитудная характеристика экспандера имеет вид кривой *г* на рис. 34.

Если экспандер используется в системе совместно с компрессором, что для полного восстановления динамического диапазона необходимо, чтобы кривые *б* и *г* на рис. 34 были симметричны относительно прямой линии, расположенной под углом 45° к осям, т. е. чтобы для любого диапазона уровней произведение коэффициентов усиления компрессора и экспандера было постоянным.

Изменение динамического диапазона производят также с помощью ограничителей максимальных уровней, в которых коэффициент усиления изменяется только с определенного номинального уровня, при котором величина нелинейных искажений не превосходит допустимых пределов. Если уровни сигналов ниже заданного уровня, то ограничитель работает, как обычный усилитель с постоянным коэффициентом усиления, т. е. с амплитудной характеристикой вида *а* на рис. 34. При превышении номинального уровня коэффициент усиления ограничителя начинает падать, так же как у компрессора. Амплитудная характеристика ограничителя имеет вид кривой *в* на том же рисунке.

Ограничитель максимальных уровней позволяет устранить искажения, возникающие от перегрузки аппаратуры, снижая максимальные пики напряжения сигнала.

Блок-схемы компрессора, экспандера и ограничителя максимальных уровней приведены на рис. 35. В каждой из этих схем напряжение звуковой частоты подводится ко входу РУ, а также к дополнительному усилителю, после которого оно поступает на детектор. С выхода детектора на управляющий вход РУ подается постоянное

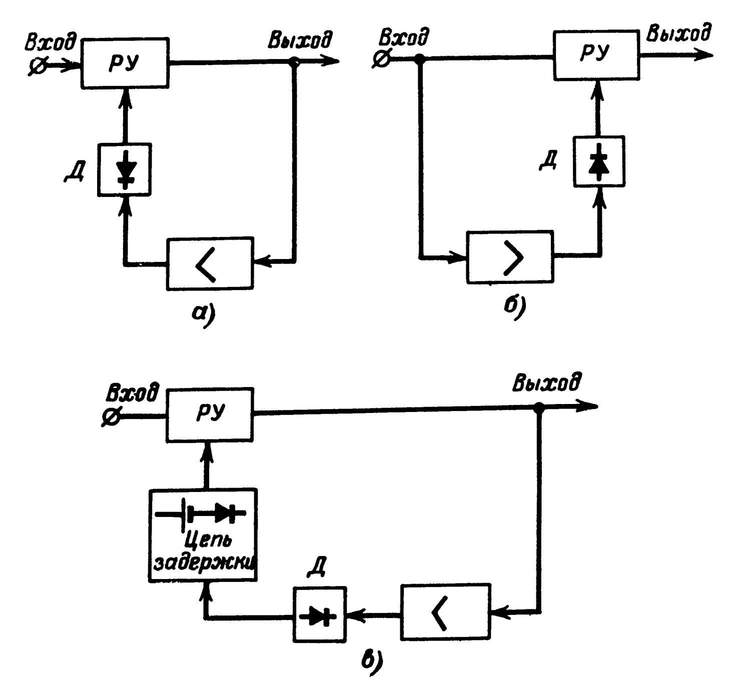


Рис. 35. Блок-схема компрессора (*а*), экспандера (*б*) и ограничителя максимальных уровней (*в*).

управляющее напряжение, амплитуда которого изменяется в соответствии с огибающей входного сигнала, иными словами, в соответствии с уровнем громкости звукового сигнала.

Полярность управляющего напряжения и характеристики РУ выбираются такими, чтобы при передаче громких сигналов усиление РУ в схеме на рис. 35,*а* уменьшалось, а при передаче слабых сигналов — было большим. В схеме на рис. 35,*б* процесс регулирования обратный: здесь РУ уменьшает усиление для громких сигналов и увеличивает его для слабых сигналов.

Как видно из рис. 35,*а* и *б*, управляющая цепь может подключаться как к входу, так и к выходу РУ. Это будут соответственно прямая и обратная регулировки. Компрессоры выполняются с обратной регулировкой, а экспандеры — чаще всего с прямой. Экс-

пандеры с обратной регулировкой имеют меньшую стабильность, так как в этом случае слабые отклонения напряжения на выходе экспандера, вызванные нестабильностью самого РУ, будут снова приложены к РУ, в результате чего общая нестабильность системы возрастет.

Сглаживающий фильтр в детекторе *Д* представляет собой обычную интегрирующую *RC*-цепочку. Чем меньше время заряда конденсатора, тем выше быстродействие автоматического регулятора. Однако при времени меньшем 1—2 *мсек* появляются паразитные помехи импульсного характера («щелчки срабатывания»).

Для уменьшения нелинейных искажений время разряда конденсатора следует выбирать большим, порядка 0,5—2 *сек*. Обычно редко удается получить постоянную времени заряда менее 10 *мсек*, а разряда — более 2 *сек* при хорошей работе компрессора и экспандера.

Ограничитель максимальных уровней (рис. 35,*в*) отличается от компрессора добавлением цепи задержки, содержащей, в частности, диод, к которому приложено напряжение задержки таким образом, что он не проводит ток. Если уровень сигнала на входе РУ мал, а соответственно мало и постоянное напряжение, поступающее с выхода детектора, то диод в цепи задержки не проводит, управляющее напряжение на РУ не подается и он работает, как обычный усилитель с постоянным коэффициентом усиления.

При превышении сигналом запирающего напряжения на диоде он начинает проводить и на РУ поступает управляющее напряжение, которое уменьшает его коэффициент усиления. В дальнейшем управляющее напряжение будет увеличиваться при увеличении входного сигнала, в результате чего напряжение на выходе РУ будет повышаться лишь незначительно (см. кривую *в* на рис. 34).

В литературе опубликовано много схем экспандеров, однако не все они удовлетворяют следующим основным требованиям, предъявляемым к ним: время заряда конденсатора 1 *мсек* или меньше; время разряда около 2 *сек*; небольшие нелинейные искажения; малый коэффициент комбинационных искажений; простота управления. Если выполнить эти требования, то расширение диапазона будет производиться незаметно для человеческого уха.

Описанный ниже экспандер (рис. 36) удовлетворяет всем перечисленным требованиям. Он включается между каскадами высококачественного усилителя НЧ. Сигнал, поступающий на вход экспандера, усиливается резистивно-емкостным усилителем, собранным на левой половине лампы $Л_1$, и подается на фазоинвертор с разделенной нагрузкой на правой половине лампы $Л_1$, а с него — на управляющие сетки лампы $Л_2$. Лампа $Л_2$ вместе с обоими триодами лампы $Л_3$ образует регулируемый усилитель с управляемой нагрузкой, который нами уже рассматривался ранее (рис. 13). Одновременно звуковой сигнал поступает на усилитель на левой половине лампы $Л_4$, а с него — на катодный повторитель иа правой половине лампы $Л_4$. На сетку катодного повторителя подано напряжение +50 *в*, для того чтобы предотвратить запирание лампы при больших отрицательных пиковых сигналах на сетке. Нагрузкой катодного повторителя является детектор на диодах $Д_1$ и $Д_2$.

При малых уровнях входного сигнала отрицательное напряжение, подаваемое с детектора на управляющие сетки лампы $Л_3$, незначительно, обе половины лампы имеют малое сопротивление и коэффициент усиления РУ на лампах $Л_2$, $Л_3$ минимальный.

При увеличении уровня входного сигнала с детектора снимается большое отрицательное напряжение (в предельном случае—20 *в*), обе половины лампы $Л_3$ запираются и коэффициент усиления РУ возрастает. Таким образом, усиление схемы увеличивается при передаче громких сигналов и уменьшается при передаче слабых сигналов. Следовательно, динамический диапазон сигнала на выходе усилителя получается во много раз больше, чем на входе усилителя.

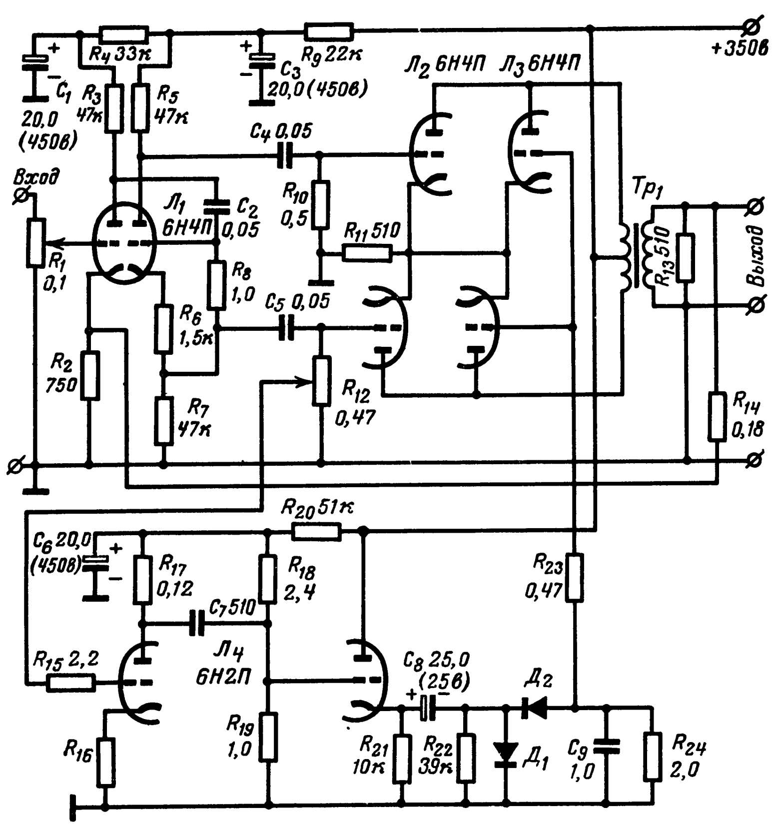


Рис. 36. Схема экспандера для высококачественного усилителя НЧ.

Время разряда конденсатора C_9 через резистор R_{24} равно 2 *сек*. Время заряда, определяемое величиной выходного сопротивления катодного повторителя и емкостью конденсатора C_9, составляет менее 1 *мсек*.

Схема может обеспечить расширение диапазона на 15 *дб*. Однако, как показывает опыт, почти для всех видов музыки вполне достаточно расширения на 8 *дб*. Остальные 7 *дб* погашаются введением обратной связи с выхода схемы на катод левой половины

лампы $Л_1$, что приводит также к уменьшению частотных и нелинейных искажений и к спрямлению характеристики регулирования.

Экспандер следует применять при воспроизведении музыкальной программы с очень большим первоначальным динамическим диапазоном, когда он наверняка был сужен звукорежиссером или посредством компрессирования Использование экспандера для воспроизведения звуковой программы, имеющей небольшой динамический диапазон (например, сольное исполнение), приводит к неестественному звучанию музыки.

ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРОМКОСТЬЮ

За последние годы значительно повысились качественные показатели бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Намного увеличились размеры экранов телевизоров, появились сверхдолгоиграющие грампластинки и магнитные ленты. Снова начинают применяться автоматы для смены грампластинок, исчезнувшие было с появлением долгоиграющих пластинок, но теперь уже эти автоматы применяются именно с долгоиграющими пластинками, что позволяет получить многочасовое воспроизведение музыки. Широкое распространение получает высококачественное объемное и стереофоническое воспроизведение звука через выносные акустические агрегаты и звуковые колонки. Все это привело к тому, что зритель и слушатель ныне уже не «привязаны» к радиоаппарату и располагаются от него на значительном расстоянии. Поэтому, как в промышленной, так и в любительской аппаратуре наряду с разнообразными автоматическими регулировками все чаще применяется дистанционное управление характером передачи, в частности громкостью звука, осуществляемое с помощью выносных пультов.

Нередко для этой цели применяют ручные регуляторы, представляющие собой вынесенные из радиоприбора потенциометрические регуляторы громкости. Однако эти регуляторы не дают хороших результатов при использовании в аппаратуре высокого класса и при длинных проводах из-за наводок переменных полей на управляющую цепь даже при тщательной ее экранировке. Кроме того, частотная характеристика таких регуляторов зависит от положения движка потенциометра. Входная емкость лампы и емкость между проводами, влияние которой изменяется в процессе регулирования громкости, вызывают значительный завал частотной характеристики на высших звуковых частотах

Уменьшить наводки переменных полей можно было бы увеличением напряжения сигнала, поступающего на регулятор громкости, включив его в последних каскадах, где сигнал велик, однако это может привести к нелинейным искажениям в первых каскадах, стоящих перед регулятором.

Для полного устранения наводок необходимо отделить звуковую цепь от управляющей. При этом для дистанционного управления можно использовать почти любой описанный в предыдущих главах РУ. Важно лишь, чтобы он вносил незначительные нелинейные искажения и по возможности обладал большим диапазоном регулирования.

Особенно перспективными в этом отношении оказываются РУ с полупроводниковыми приборами-двухполюсниками: диодами, варисторами, магнито- и фоторезисторами и др. Большой разброс параметров этих приборов и температурная нестабильность не имеют

большого значения, так как слушатель всегда имеет возможность произвести необходимую регулировку громкости звука.

Приводимые в литературе схемы дистанционных регуляторов громкости имеют общий недостаток: громкость звука в них изменяется для всех частот одинаково; иными словами, эти регуляторы не позволяют осуществлять компенсированную регулировку громкости звука. В гл. 2 мы приводили схему ручного компенсированного регулятора громкости, не требующего потенциометра с отводами (рис. 7,*а*). Ее-то и можно использовать для дистанционной регулировки громкости. Для этого потенциометр R_1 следует заменить комбинацией постоянного резистора и сопротивления какого-либо управляемого нелинейного элемента — электронной лампы, транзистора, варистора, терморезистора и т. д. Постоянный резистор и управляемый элемент соединяются последовательно по переменному току. Точка их соединения подключается к нижнему выводу резистора R_7 вместо движка потенциометра.

В стереофонических системах воспроизведения звука оказывается необходимым не только установить общий уровень звуковоспроизведения, но также отрегулировать относительное усиление обоих каналов. Балансировка усиления по каналам применяется при переключении источников звуковой программы (магнитофон, проигрыватель, приемник ЧМ сигналов и т. д.).

Наиболее эффективно и удобно осуществлять регулировку баланса из той точки, где находится слушатель. Причем здесь могут сразу регулироваться как общий уровень громкости, так и балансировка уровней по каналам. Это можно осуществить с помощью двух управляемых дистанционно усилителей (рис. 37). Каждый из усилителей содержит каскад усиления напряжения на одном из триодов лампы $Л_1$ ($Л_2$) и катодный повторитель на другом триоде. С катодов повторителей осуществляется отрицательная обратная связь на сетки правых (по схеме) триодов ламп $Л_1$ и $Л_2$. В управляющие цепи усилителей включены фоторезисторы, которые расположены в одном корпусе с лампами накаливания $Л_3$ и $Л_4$. Изменяя токи в цепях ламп перемещением движков потенциометров R_1 и R_9, можно менять яркость свечения ламп. Изменяющийся световой поток, воздействуя на фоторезистор, меняет его внутреннее сопротивление, а значит, и коэффициент усиления РУ.

Потенциометры R_1 и R_9 размещаются на выносном пульте дистанционного управления. С их помощью можно устанавливать громкость каждого канала в отдельности и добиваться балансировки уровней.

Регулируемый усилитель подключается между предварительным и оконечным усилителями готового стереофонического звуковоспроизводящего устройства. С этой целью коэффициент его усиления сделан равным единице. Диапазон регулирования схемы составляет 60 *дб*, коэффициент нелинейных искажений — не более 0,05% при входном напряжении 1 *в*, диапазон воспроизводимых частот 20 *гц* — 30 *кгц*. Очевидно, этот усилитель можно использовать и в высококачественном монофоническом звуковоспроизводящем устройстве (взяв одну его часть) для дистанционного регулирования звука.

Описанный принцип дистанционного управления уровнем радиолюбитель может использовать не только для изменения громкости воспроизведения, но и для других целей. Из них можно отметить следующие: дистанционное наложение различных звуковых про-

грамм, в частности при озвучении или демонстрации кинофильмов; изменение тембра звука во время передачи путем введения низших или высших частот; плавное включение и выключение ревербератора и т. п.

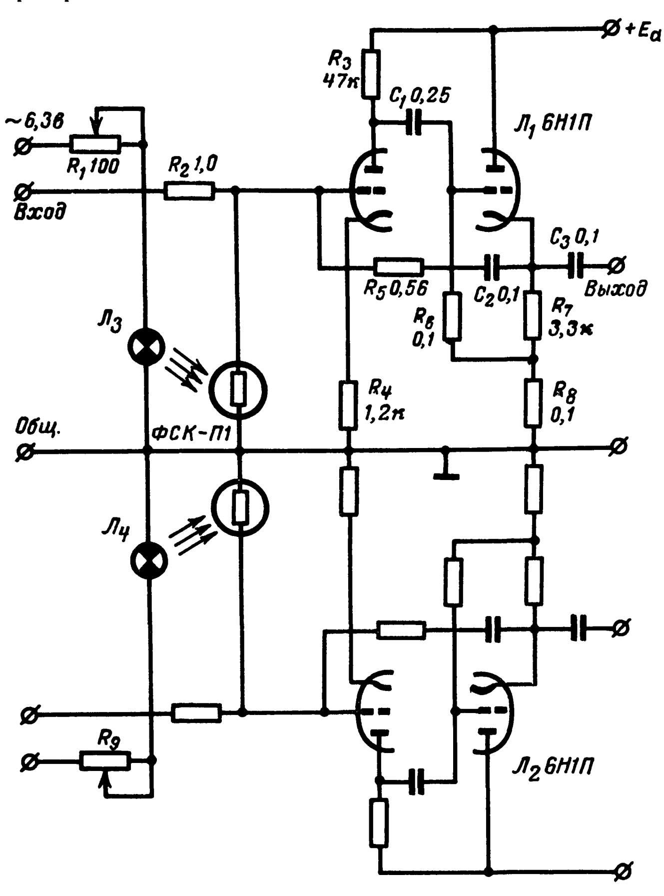


Рис. 37. Схема дистанционного управления громкостью стереофонического усилителя.

В последнее время появились телевизоры и радиоприемники с беспроволочным дистанционным управлением. Системы дистанционного управления состоят из маломощного передатчика, размещаемого в пульте дистанционного управления, и приемника, связанного со схемой регулировки радиоаппарата.

Передатчик выполняется на одном-двух транзисторах и работает чаще всего на ультразвуковых частотах, при этом излучателем колебаний является электростатический громкоговоритель.

Предлагалось также использовать сверхдлинные (свыше 3 000 *м*), промежуточные между ДВ и СВ диапазонами (580—720 *м*) и ультракороткие волны любительских диапазонов. Слушатель, желая произвести переключение программ (диапазонов), регулировку яркости, контрастности или громкости звука, нажимает на клавиши или вращает ручки на пульте управления. В результате этого изменяются амплитуда или частота колебаний передатчика, длительность и количество посылок, а в некоторых случаях и частота или амплитуда модулирующего напряжения.

Приемник системы дистанционного управления собирается по схеме прямого усиления, а на ультразвуковых частотах — это просто электростатический микрофон с резонансным усилителем. Выходом приемника являются исполнительные устройства — реле, электромагниты, двигатели и шаговые искатели.

В системах дистанционного управления можно использовать узлы и схемы, применяющиеся в системах радиоуправления моделями и телеметрии. При этом схемы передатчика и приемника сильно упрощаются, поскольку из-за малого радиуса действия системы дистанционного управления можно намного уменьшить мощность передатчика и чувствительность приемника. При дистанционной регулировке громкости звука лучше всего использовать электромеханический регулятор по схеме на рис 8, так как этот регулятор не меняет своей установки после прекращения действия управляющего сигнала.

ЗВУКОЗАПИСЬ

Отношение сигнал/шум в звукозаписывающей аппаратуре бытового назначения обычно равно 35—40, в лучшем случае 50 *дб*, что недостаточно для записи некоторых видов музыкальных произведений в исполнении, например, симфонического оркестра, орга́на или даже фортепиано, так как динамический диапазон этих инструментов составляет, как указывалось выше, 50—70 *дб*. Малый динамический диапазон звукозаписывающей аппаратуры объясняется прежде всего значительным уровнем собственных шумов звуконосителя

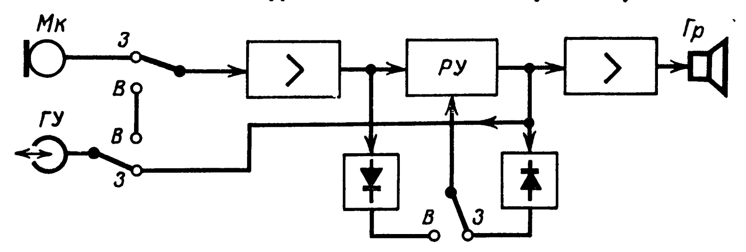


Рис. 38. Блок-схема магнитофона с компрессором-экспандером.

(магнитной ленты). Поэтому для возможности записи этих музыкальных программ с большим динамическим диапазоном нередко применяют компрессор в тракте записи магнитофона и экспандер в тракте воспроизведения.

В бытовых магнитофонах, имеющих общий, универсальный усилитель, можно использовать одно устройство, осуществляющее как сжатие, так и расширение динамического диапазона. Блок-схема

магнитофона с таким устройством приведена на рис. 38. В режиме записи (*З*) управляющий сигнал отрицательной полярности вырабатывается в результате детектирования выходного сигнала, поэтому РУ работает как компрессор. В режиме воспроизведения (*В*) РУ вместе с детектором, подключенным к его входу, работает как экспандер.

Однако экспандирование, механически расширяя динамический диапазон звуковоспроизведения, не позволяет воссоздать закон изменения громкости звуков, присущих той или иной музыкальной фразе данного произведения. А раз переход от тихих звуков к громким осуществляется не так, как он был задуман композитором или исполнителем, а всегда по одному и тому же закону, определяемому характеристиками примененных компрессора и экспандера, то налицо искажение замысла автора, нарочитость и принужденность исполнения.

Иное дело, если бы нам удалось каким-то образом зафиксировать информацию о громкости звука в каждый момент времени в каком-либо устройстве памяти и затем воспроизводить музыку, используя эту информацию. Тогда громкость воспроизведения менялась бы в том же динамическом диапазоне и точно по такому же закону, как и при исполнении на музыкальном инструменте.

Поскольку речь идет о звукозаписи, то, очевидно, запоминание этой информации можно осуществить путем ее записи на тот же самый звуконоситель, на который производится запись основной звуковой программы, причем имеется возможность использовать для этой цели всего одну дорожку магнитофона. В этом случае во время записи на ленту, помимо основной программы, наносится так называемый пилот-тон — вспомогательный сигнал определенной частоты и меняющейся амплитуды. Частоту пилот-тона берут несколько выше верхней частоты полосы пропускания магнитофона. В частности, для магнитофона с верхней частотой пропускания 10 *кгц* частоту пилот-тона можно взять равной 13,5 *кгц*, поскольку более высокая частота плохо записывается магнитофоном, а более низкая влияет на качество записи музыкальной программы.

Ниже приводится описание встраиваемого в магнитофон устройства, в котором восстановление динамического диапазона производится несколько иным методом, чем это рекомендовалось выше. В магнитофоне с таким устройством уровень записи регулируется ручным регулятором, причем оператор следит по стрелочному прибору или оптическому индикатору, не допуская увеличения нелинейных искажений вследствие перегрузки первого каскада усилителя записи. В процессе записи все время происходит изменение динамического диапазона, определяемое положением регулятора уровня записи.

На ту же самую дорожку магнитной ленты записывается пилот-тон частотой 13,5 *кгц*, амплитуда которого изменяется при повороте ручки регулятора уровня, т. е. имеет место процесс амплитудной модуляции.

Блок-схема тракта записи магнитофона показана на рис. 39,*а*. Компрессирование записываемого сигнала осуществляется потенциометром R_1 — регулятором уровня записи, к верхнему концу которого подключен генератор пилот-тона *ГПТ*. При перемещении движка этого потенциометра будет меняться как уровень сигнала, снимаемого с микрофона *Мк*, так и напряжение пилот-тона, подаваемое на головку записи *ГЗ*.

Во время воспроизведения звука пилот-тон отделяется от звуковой программы с помощью полосового фильтра *ПФ*, как это показано на блок-схеме тракта воспроизведения магнитофона (рис. 39,*б*), усиливается резонансным усилителем и детектируется детектором *Д*. На выходе детектора мы получаем огибающую модулированного сигнала, представляющую собой постоянное напряжение, величина которого изменяется в соответствии с вращениями ручки регулятора уровня, производимыми при записи.

Далее постоянное изменяющееся напряжение подается на РУ, включенный в тракт воспроизведения. Диод в детекторе включен таким образом, что на выходе его получается отрицательное управ-

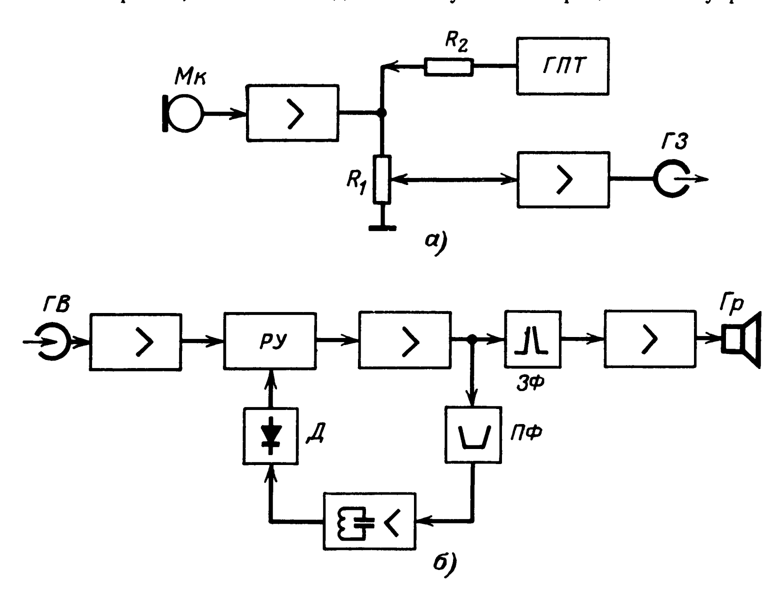


Рис. 39. Блок-схема магнитофона с устройством для расширения динамического диапазона.

ляющее напряжение, причем оно тем больше, чем выше по схеме положение движка регулятора уровня записи, т. е. чем выше уровень записи.

Если производилась запись какой-либо звуковой программы со сравнительно небольшим динамическим диапазоном (речь, сольное исполнение), когда регулятор уровня записи находился в одном из максимальных положений (ближе к верхнему краю на рис. 39,*а*), то уровень записи пилот-тона также был большим, и при воспроизведении отрицательное напряжение на детекторе *Д* (в схеме на рис. 39,*б*) имеет большую величину. Поскольку РУ в этой схеме работает на электронной лампе с управлением по первой сетке при убывающей регулировочной характеристике, то усиление РУ при подаче на него большого отрицательного напряжения получается небольшим. После РУ в тракте воспроизведения включены еще не-

сколько усилителей низкой частоты, так что звуковой сигнал в громкоговорителе воспроизводится с нормальной громкостью.

Если же записывается программа с большим динамическим диапазоном, то приходится снижать уровень записи при очень больших громкостях звука с помощью переменного резистора R_1 в схеме на рис. 39,*а*, с тем чтобы не превышать предельного напряжения, подаваемого на вход усилителя записи. Так как при этом одновременно снижается и уровень записи пилот-тона, то с детектора *Д* (рис. 39,*б*) будет сниматься меньшее отрицательное напряжение и коэффициент усиления РУ будет выше, чем в первом случае. Звуковой сигнал в громкоговорителе будет воспроизводиться с повышен-

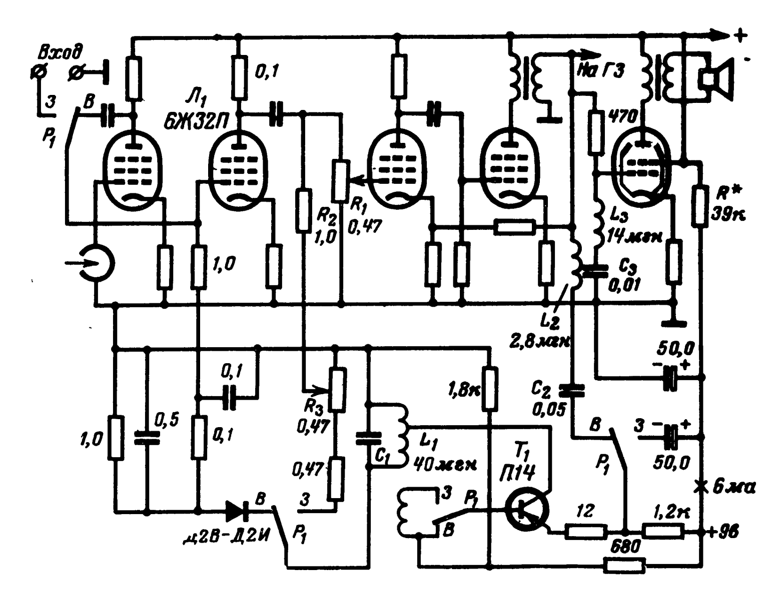


Рис. 40. Схема устройства для изменения динамического диапазона в магнитофоне.

ной громкостью, хотя мы и уменьшили уровень записи регулятором уровня Таким образом, устройство позволяет устранить влияние этого регулятора, компенсируя уменьшение уровня записи. В результате восстанавливается первоначальный динамический диапазон сигнала музыкальной программы (при необходимости его можно даже расширить).

На рис. 40 приведена принципиальная схема встроенного в магнитофон устройства для изменения динамического диапазона. Универсальный усилитель записи-воспроизведения изображен здесь упрощенно. Регулируемый усилитель собран на лампе $Л_1$ с управлением по первой сетке Каскад на транзисторе T_1 работает как резонансный усилитель при воспроизведении и как генератор пилот-тона при записи. Коммутация в схеме осуществляется контактами реле P_1, на обмотку которого питание подается переключателем

рода работы магнитофона или кнопкой «Запись», либо с катодного резистора в оконечном каскаде усилителя.

Все резонансные контуры (L_1C_1, L_2C_2 и L_3C_3) настраиваются на частоту 13,5 *кгц*. Контур L_2C_2, представляющий собой полосовой фильтр, предназначен для выделения пилот-тона из воспроизводимого сигнала и подачи его на резонансный усилитель. Контур L_3C_3 является заграждающим фильтром, он служит для предотвращения попадания напряжения пилот-тона на оконечный усилитель и громкоговоритель.

Устройство позволяет расширить динамический диапазон магнитофона на 15 *дб*. Желаемая степень расширения устанавливается потенциометром R_3.

Все сказанное выше о динамическом диапазоне записи на магнитную ленту в полной мере относится и к грамзаписи, особенно любительской, с той лишь разницей, что здесь приходится еще больше сужать динамический диапазон из-за повышенного шума граммофонных пластинок. Кроме того, во время записи на пластинку необходимо уменьшать уровень излишне громких сигналов; в противном случае может произойти перерезание соседних канавок грампластинки вследствие значительной амплитуды колебаний записывающего резца. Поэтому при записи часто применяют не только компрессоры, поднимающие нижний уровень динамического диапазона, но также и ограничители максимальных уровней или же компрессоры двустороннего действия. В результате динамический диапазон записи становится равным 35—40 *дб*. Применив экспандер, удается расширить его до 50—55 *дб*. Очевидно, компрессоры и экспандеры должны иметь одинаковые, но обратные по знаку характеристики.

В заключение укажем еще на одно применение РУ в звукозаписи для автоматической регулировки уровня записи. Происходящие процессы при этом аналогичны процессам в компрессоре. Здесь также сигнал с выхода усилителя записи выпрямляется детектором и поступает на РУ, в качестве которого может служить, например, усилительный каскад на транзисторе с управлением по току эмиттера.

Автоматическая регулировка уровня позволяет производить звукозапись без установки первоначального уровня, избавляет от необходимости регулировать усиление в процессе записи, что сильно облегчает работу с аппаратурой не только начинающему, но и более опытному радиолюбителю.

Впрочем, не помешает автоматическая регулировка уровня записи и в профессиональной аппаратуре, управляемой квалифицированным звукооператором, если необходимо записать, например, лекцию перемещающегося по кафедре лектора или выступление оратора, особенно когда звукооператор непосредственно не находится в зале. Не обойтись без автоматической регулировки уровня в различной автоматической звукозаписывающей аппаратуре, диктофонах и потайных магнитофонах.

Следует иметь в виду, что автоматические регуляторы уровня, работающие по сути дела как компрессоры, сильно снижают динамический диапазон записи Что же касается применения их в диктофонах и потайных магнитофонах, то снижение динамического диапазона здесь как нельзя кстати, так как это приводит к выравниванию речевой записи и облегчает ее последующую перепечатку на машинке.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В радиоэлектронике широкое распространение получили усилители постоянного тока (УПТ), осуществляющие усиление медленно изменяющихся сигналов. Они применяются в ламповых вольтметрах и милливольтметрах постоянного тока, в различных измерительных и генераторных устройствах, работающих в диапазоне инфранизких частот, в системах автоматики и вычислительной гехники, стабилизаторах напряжения, в системах АРУ радиоприемников.

Усилители постоянного тока могут быть прямого действия и с преобразованием. Усилители прямого действия более просты по схеме и конструкции и обладают большим входным сопротивлением. Однако эти УПТ имеют крупный недостаток, нередко сводящий на нет все их преимущества. Это так называемый «дрейф нуля» — нестабильность нулевого значения напряжения на выходе усилителя, вызванная нестабильностью питающих напряжений, старением ламп, влиянием температуры и другими факторами. Искусственные методы уменьшения дрейфа нуля не обеспечивают все же стабильной работы этих УПТ в течение длительного времени.

Усилитель постоянного тока с преобразованием имеет гораздо меньший дрейф нуля, поскольку в нем используются усилители переменного напряжения, на работу которых меньше влияют непостоянство напряжения источника питания и изменение температуры Преобразователь на входе УПТ превращает медленно изменяющееся постоянное напряжение в переменное напряжение определенной частоты.

В основе преобразования лежит принцип амплитудной модуляции, при которой амплитуда переменного напряжения несущей частоты изменяется по закону усиливаемого сигнала. Поэтому такой преобразователь называют модулятором. Модулированные колебания усиливаются до необходимой величины, а затем детектируются с целью выделения напряжения, пропорционального входному сигналу.

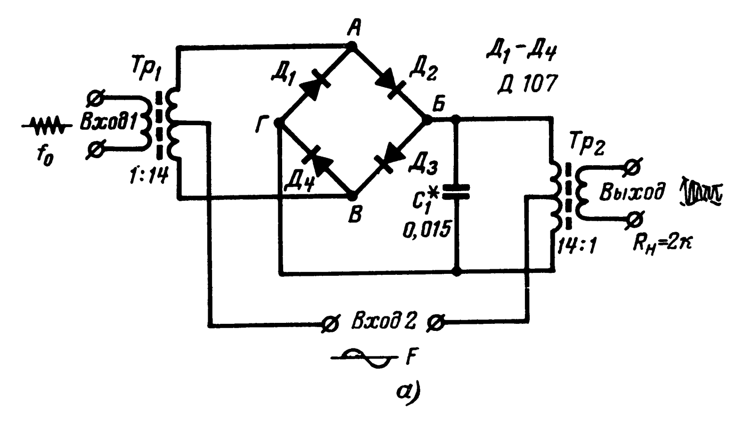
В УПТ с преобразованием можно получить очень большую чувствительность при увеличении числа усиливаемых каскадов, в то же время не предъявляя требований к особой стабильности питающих напряжений и температурной стабильности каскадов. В качестве модуляторов в УПТ можно использовать РУ. В этом случае на вход РУ чаще всего подают напряжение несущей частоты, а на управляющий вход — изменяющееся постоянное напряжение, подлежащее усилению. Коэффициент усиления РУ будет зависеть от управляющего напряжения, т е. будет иметь место амплитудная модуляция.

Можно повысить глубину модуляции, если работать одновременно с двумя РУ, включенными по двухтактной схеме. Одно из напряжений поступает на оба РУ в противофазе, а другое — в фазе. Такие схемы носят название балансных модуляторов. Эффективность работы этих модуляторов в 2 раза выше, чем однотактных.

В схемах балансных модуляторов могут быть применены почти любые РУ, приводимые в предыдущих главах. При использовании ламп и транзисторов их часто включают по двухтактной схеме, аналогично выходному каскаду с промежуточным и выходным трансформаторами. На вход каскада через промежуточный трансформатор поступает переменное напряжение несущей частоты, а управляющее напряжение подают на какой-либо другой электрод усилитель-

ного прибора — на коллектор, эмиттер, анод, экранирующую, сигнальную или защитную сетки либо также на управляющую сетку лампы и базу транзистора. Одна из балансных схем РУ на лампах приводилась раньше (см. рис. 13).

Кольцевой модулятор (рис. 41,*а*) обеспечивает еще большую эффективность модуляции. В схеме кольцевого модулятора диоды



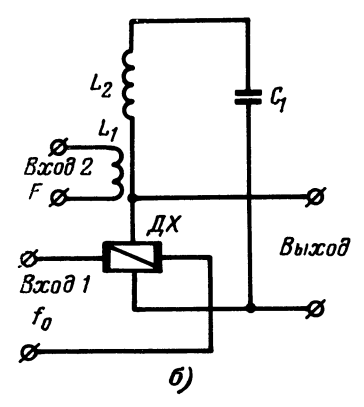


Рис. 41. Схемы преобразователей постоянного тока в переменный (модуляторов).

направлены по замкнутому контуру (отсюда и название модулятора — кольцевой).

На *Вход 1* поступает опорное напряжение с частотой 400 *гц* и амплитудой 10 *в*, а на *Вход 2* — напряжение низкой частоты, которое надо преобразовать. При отсутствии этого напряжения мост из диодов сбалансирован и напряжение на выходе схемы равно нулю. При подаче на *Вход 2* постоянного напряжения, приложенного «плюсом» к трансформатору $Тр_2$, симметрия схемы будет нарушена, дифференциальное сопротивление диодов $Д_1$ и $Д_3$ уменьшится и между точками *Г* и *Б* моста, а соответственно и на выходе схемы появится переменное напряжение несущей частоты, зависящее от значения постоянного напряжения.

Чувствительность модулятора составляет 0,01 *мка* при комнатной температуре. При изменении температуры окружающей среды от 25 до 80° С дрейф нуля составляет 0,1 *мка* на градус.

Интересные результаты дает применение в преобразователях датчиков Холла и магниторезисторов, поскольку они имеют очень малый дрейф нуля. В датчике Холла ток через него создается источником постоянного напряжения, а переменное магнитное поле — на-

пряжением несущей частоты, подаваемым на обмотку электромагнита (рис. 41,*б*). На выходных электродах датчика образуется переменная э д с, управляемая постоянным током через датчик. Тогда на выходе датчика образуется напряжение с несущей частотой и амплитудой, пропорциональной току через датчик.

Недостатками такого преобразователя постоянного тока в переменный являются большая мощность, потребляемая электромагнитом, и наличие наводок переменного магнитного поля на выходные цепи датчика Если на обмотку электромагнита подавать не переменное напряжение несущей частоты, а постоянное медленно изменяющееся напряжение, то удается устранить указанные выше недостатки Но этого не делают из-за значительного дрейфа нуля, который вызывается наличием остаточного намагничивания в электромагните

Можно, однако, ликвидировать остаточное намагничивание при подаче постоянного напряжения на электромагнит, а переменного на датчик, если включить в выходную цепь дополнительную обмотку L_2 последовательно с конденсатором C_1. Усиливаемый сигнал с выхода датчика поступает на обмотку L_2, воздействуя на датчик Холла Таким образом, осуществляется положительная обратная связь по магнитному потоку с выхода датчика на один из его входов.

Нечто подобное мы наблюдаем в регенеративном приемнике прямого усиления В детекторном каскаде такого приемника осуществляется положительная обратная связь, при которой часть энергии из анодной цепи подается в сеточную цепь, в результате чего возрастают чувствительность и избирательность приемника Этот каскад находится на границе самовозбуждения При увеличении обратной связи или при больших входных сигналах энергия анодной цепи становится несоизмеримо большой и в детекторном каскаде возникают собственные автоколебания Усиления входного сигнала не происходит

В нашем случае с датчиком Холла в каждый период входного тока через датчик при максимальной его амплитуде в схеме возникает генерация с частотой колебательного контура L_2C_1, в несколько раз превышающей частоту входного тока В результате в обмотке L_2 появляются импульсы тока повышенной частоты, приводящие к размагничиванию сердечника электромагнита.

В схемах преобразователей напряжения могут также найти применение и магниторезисторы Одной из схем на магниторезисторах, которая может быть использована в модуляторе, является балансная схема, приведенная на рис 33,*б*.

Достоинствами модуляторов на датчиках Холла и магниторезисторах являются малый дрейф нуля, большая точность работы, способность преобразовывать напряжение сигнала довольно большой частоты, а также надежность и сравнительная простота схемы

ЭЛЕКТРОМУЗЫКАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Основными узлами любого электромузыкального инструмента являются: генератор (или несколько генераторов) тона, манипулятор, темброблок, модулятор вибрато, генератор вибрато и звуковоспроизводящее устройство (усилитель и громкоговоритель).

Генератор тона в одноголосном электромузыкальном инструменте представляет собой электронный генератор, изменяющий свою частоту при нажатии на клавишу или гриф. В качестве генератора

тона чаще всего используются релаксационные генераторы (мультивибраторы, транзитронные генераторы, генераторы на газоразрядных приборах), вырабатывающие несинусоидальные колебания с содержанием большого числа гармоник. В отличие от одноголосных инструментов, в которых в каждый момент времени может воспроизводиться только один звук — одна музыкальная нота, соответствующая нажатой клавише, многоголосные электромузыкальные инструменты позволяют воспроизводить одновременно несколько звуков, соответствующих разным нотам, и исполнять не только мелодию, но и аккомпанемент. В многоголосных инструментах применяется гораздо больше генераторов тона — по числу клавиш в клавиатуре или хотя бы 12 генераторов — по количеству тонов и полутонов в одной октаве (в последнем случае во всех других октавах используются электронные делители частоты). Поскольку каждый генератор здесь работает только на одной фиксированной частоте, в этих инструментах можно применять генераторы синусоидальных колебаний, которые имеют бо́льшую стабильность частоты, чем релаксационные генераторы.

Для изменения окраски звука в электромузыкальном инструменте имеется темброблок. Как известно, каждый отдельный музыкальный инструмент или человеческий голос имеет вполне определенный, присущий ему тембр. Он зависит прежде всего от соотношения гармонических составляющих в данном звуковом колебании, а соотношение гармоник определяется свойствами колебательной системы музыкальных инструментов или структуры голосового аппарата человека.

Обычно темброблок содержит переключатель кнопочной или клавишной конструкции и набор *LC*-контуров, *RC*-фильтров, диодов, конденсаторов, резисторов и других элементов. При нажатии на несколько кнопок (клавиш) в различных сочетаниях можно получить большое разнообразие тембров, как похожих на тембры обычных музыкальных инструментов, так и своеобразных тембров, которыми не обладает ни один музыкальный инструмент или голос.

Колебания с темброблока поступают на звуковоспроизводящее устройство с громкоговорителем или акустическим агрегатом.

Кроме описанных выше узлов в электромузыкальных инструментах применяется ряд других важных узлов, из которых по крайней мере три узла — манипулятор, регулятор громкости и модулятор — содержат регулируемые усилители, а потому будут рассмотрены нами более подробно.

Манипулятор. При нажатии на какую-либо клавишу электромузыкального инструмента замыкаются контакты под этой клавишей и генератор тона вырабатывает колебания с определенной частотой. Если не принять специальных мер, то появление и исчезновение звука будут сопровождаться щелчками и тресками в результате замыкания и размыкания контактов. Манипулятор позволяет включать звуковую цепь не резко, скачком, а плавно и так же плавно выключать ее.

В качестве манипулятора используют РУ, изменяющий свое усиление при замыкании и размыкании контакта, включенного в управляющую цепь.

Схема манипулятора для получения хотя бы нескольких тембров должна обеспечивать большой диапазон изменения длительности включения и выключения РУ, поскольку тембр звука зависит не

только от соотношения гармоник незатухающего колебания, но и от скорости появления и пропадания звука (атаки и затухания).

Время атаки и затухания в разных инструментах различно. На скрипке, например, звук возникает за 1/3 *сек*, а на духовых инструментах — за 1/50 *сек*. Исследования показали, что процесс возникновения и затухания звука в обычных музыкальных инструментах происходит по экспоненциальному закону, т. е. примерно так же, как изменяется напряжение на конденсаторе при его заряде и разряде через активное сопротивление. Это как раз и используется в манипуляторах: управляющий вход РУ подключают к зарядно-разрядной *RC*-цепочке. При этом предпочитают применять РУ с регулировочной характеристикой, близкой к линейной (вида *А* или *Г*). Манипуляторы на лампах чаще всего используют РУ с управлением по первой сетке (рис. 11), а на транзисторах — с одновременным управлением по напряжению на коллекторе и по току эмиттера (рис. 18).

В большинстве многоголосных электромузыкальных инструментов в каждый момент времени все звуки воспроизводятся одновременно с равной громкостью. Для выделения мелодии или какого-либо звука в аккорде желательно применение в инструментах пальцевой регулировки громкости, при которой громкость каждого звука изменяется от силы нажатия на соответствующую клавишу. Применявшиеся для этих целей переменные резисторы, связанные с клавишами, работали ненадежно и быстро изнашивались. Другие способы пальцевого управления громкостью также не нашли широкого применения из-за большой ненадежности, сложности выполнения, нестабильности, малой эффективности и по иным причинам

Интересные результаты могут быть получены при использовании в качестве бесконтактных клавишных регуляторов громкости РУ с фоторезисторами, устанавливаемыми под каждой клавишей. При нажатии на клавишу открывается щель между лампой накаливания и фоторезистором и на последний падает световой поток, уменьшающий сопротивление фоторезистора Величина щели, а значит, сопротивление фоторезистора и громкость звука изменяются по мере нажима на клавишу. Недостатком пальцевого регулятора громкости на фоторезисторе является заметная инерционность последнего, что препятствует широкому распространению этого способа из-за невозможности исполнения очень быстрых музыкальных произведений.

Рассмотрим усилители с датчиками Холла и магниторезисторами. Здесь в принципе возможно создать систему, в которой интенсивность магнитного потока от магнита к полупроводниковому элементу изменялась бы при нажатии на клавишу, например, перемещением магнитного экрана, поворотом полупроводникового элемента или каким-либо другим путем. Инерционность датчиков Холла и магниторезисторов сравнительно невелика, во всяком случае вполне достаточна для использования в электромузыкальном инструменте. Главное же — это большой диапазон регулирования, который может быть доведен до 100 *дб* и более, если удастся при нажатии на клавишу управлять проводимостью сразу двух включенных последовательно датчиков Холла или магниторезисторов.

Для радиолюбителя имеется большое поле деятельности по разработке новых способов и устройств для осуществления пальцевой регулировки громкости, поскольку эта проблема, являющаяся одной из основных в создании электромузыкальных инструментов, не решена до сих пор.

Регулятор громкости. Независимо от того, имеется ли в электромузыкальном инструменте пальцевая регулировка громкости, в нем обязательно должен быть общий регулятор громкости. С его помощью исполнитель может плавно вводить и выводить музыкальную фразу, изменять громкость отдельных звуков (в одноголосном инструменте) или созвучий (в многоголосном) в зависимости от указаний композитора или замысла самого музыканта.

Однако у исполнителя на электромузыкальном инструменте всегда «не хватает рук». Даже на одноголосном инструменте, на котором играют только одной правой рукой, левая рука занята переключением тембров, регистров, вводом вибрато и регулированием его частоты, амплитуды и т. п. Поэтому общая регулировка громкости осуществляется чаще всего педальным регулятором с потенциометром, движок которого перемещается при нажатии на педаль.

Для уменьшения фона от различных наводок регулировку громкости нередко производят с помощью электронных РУ, а управляющее напряжение на них подают с потенциометра педального регулятора

Если в манипуляторах использовать РУ с фоторезисторами или магниторезисторами, то с их помощью можно производить одновременно и общее регулирование громкости. Для этого управляющее напряжение с педального потенциометра следует подать на лампы накаливания или на обмотку электромагнитов. Тогда при нажатии педали будет изменяться яркость всех ламп или магнитная индукция всех сердечников одновременно, т. е будет одинаково меняться коэффициент усиления всех РУ.

Имеются электромузыкальные инструменты, в которых клавиатура и гриф отсутствуют. Такие инструменты называются терменвоксами. Игра на них производится перемещением руки исполнителя перед небольшой штыревой антенной. При этом изменяются емкость антенны, а соответственно и частота генератора ВЧ, работающего с антенным контуром. Колебания с этого генератора поступают на детектор, на который подаются также колебания со второго генератора ВЧ, аналогичного первому, но работающего на фиксированной частоте, например 100 *кгц*. В исходном положении на детектор поступают колебания равных частот, разность между ними равна нулю и с детектора не снимаются никакие колебания звуковых частот. По мере приближения руки к штыревой антенне изменяется частота первого генератора ВЧ и с детектора снимаются звуковые колебания, частота которых равна разности частот, вырабатываемых генераторами ВЧ. Элементы ВЧ генераторов и антенного контура выбираются таким образом, чтобы при перемещении руки от максимального положения к минимальному диапазон изменения частоты звука лежал в пределах от единиц герц до 4 *кгц*, т. е. соответствовал полному частотному диапазону музыкальных инструментов и человеческого голоса.

Звуковые сигналы с детектора подаются на темброблок, а с него — на усилительное и звуковоспроизводящее устройства.

Управлять громкостью звука в описываемом инструменте можно с помощью педального регулятора. Однако удобнее регулировку громкости производить бесконтактным способом аналогично управлению высотой звука С этой целью вводится еще один, третий, генератор ВЧ, имеющий свою антенну, выполненную в виде штыря или петли из толстого провода. Управление громкостью осуществля-

ется перемещением левой руки относительно антенны Для исключения влияния друг на друга процессов управления высотой и громкостью звука обе антенны следует разносить как можно дальше.

Схема бесконтактной регулировки громкости показана на рис 42. Генератор на транзисторе T_1 собран по схеме с общей базой (по переменному току) и емкостной связью между коллектором и эмиттером. Контур L_1C_3 генератора настроен на частоту, примерно равную 100 *кгц*. Подключенный к генератору последовательный контур, состоящий из катушки L_2, конденсатора C_6 и емкости антенны A, имеет резонансную частоту, не равную частоте генератора, но близкую к ней.

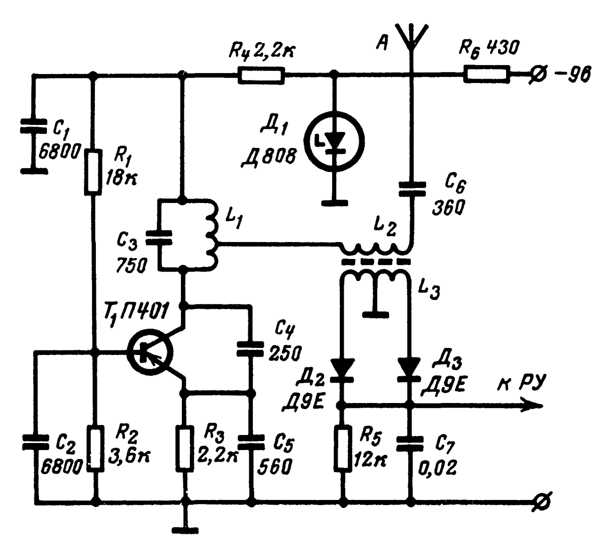


Рис. 42. Схема бесконтактной регулировки громкости электромузыкального инструмента.

Если поднести руку близко к антенне A, то изменяется ее емкость, последовательный колебательный контур оказывается настроенным в резонанс с колебательным контуром L_1C_3 генератора и напряжение на катушке L_2 становится большим Часть этого напряжения с катушки L_3 выпрямляется диодами $Д_2$ и $Д_3$ и подается на РУ, включенный в звуковую цепь инструмента. Громкость звука на выходе определяется значением управляющего напряжения, подаваемого на РУ, которое изменяется в зависимости от расстояния от руки до антенны A. Подстройка генератора перед исполнением осуществляется перемещением сердечника катушки L_1.

Модулятор. Для повышения выразительности исполнения, уменьшения монотонности и расширения тембровой «палитры» электромузыкального инструмента в нем воспроизводят эффект вибрато, который заключается в периодических изменениях высоты и громкости звука. На обычных музыкальных инструментах, например

скрипке, эффект вибрирующего звука достигается колебаниями пальцев исполнителя при нажатой струне

В электромузыкальных инструментах создают один из двух видов вибрато: звуковысотное или громкостное. Первый вид получается при частотной модуляции звуковых колебаний, для чего на генератор тона воздействуют напряжением инфранизкой частоты (5—8 *гц*) от вспомогательного генератора. Второй вид получается при амплитудной модуляции звуковых колебаний такой же инфранизкой частотой.

Звуковысотное вибрато более эффектно, чем громкостное, однако оно предполагает использование генераторов тона, чувствительных к изменению внешних факторов, в частности питающих на-

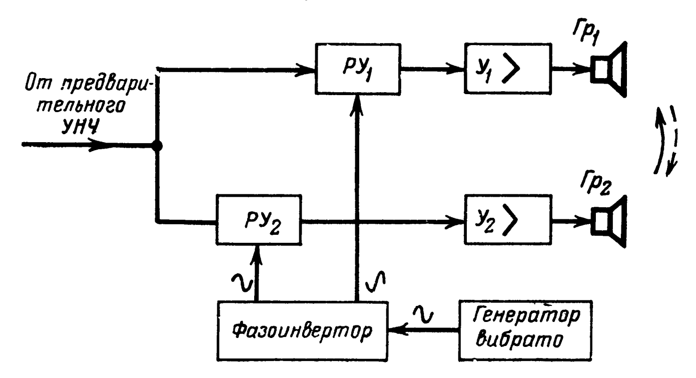


Рис. 43. Блок-схема устройства для получения пространственного вибрато.

пряжений, а это отрицательно отражается на стабильности настройки инструмента. Поэтому во многих случаях останавливаются на создании громкостного вибрато.

Для получения громкостного вибрато в электромузыкальном инструменте в качестве амплитудного модулятора можно использовать один из описанных выше РУ, включив его в звуковую цепь инструмента На управляющий вход РУ подается напряжение с генератора вибрато. Амплитуда выходного напряжения будет меняться в соответствии с колебаниями инфранизкой частоты, создавая впечатление вибрирующего звука.

Значительный интерес представляет пространственное вибрато, при котором звук как бы качается в пространстве между двумя (или более) разнесенными громкоговорителями с частотой вибрато Для его получения применяют два звуковоспроизводящих устройства со своими регулируемыми усилителями. Блок-схема устройства для получения пространственного вибрато показана на рис. 43. Звуковые колебания от предварительного усилителя низкой частоты инструмента (или от темброблока) поступают на входы двух РУ, а с них — на два одинаковых звукопроизводящих устройства с разнесенными громкоговорителями $Гр_1$ и $Гр_2$. На управляющие входы РУ подводятся напряжения с генератора вибрато одной частоты, но сдвинутые одно относительно другого на 180°, что выполняется фазоинвертором. В итоге при воздействии напряжения вибрато уве-

личение усиления одного РУ (а значит, одного канала) будет сопровождаться уменьшением усиления другого РУ (другого канала). Воспроизводимый звук будет, таким образом, «качаться» в пространстве, плавно перебрасываясь от одного громкоговорителя к другому с частотой вибрато.

ОЗВУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВ

Звуковоспроизводящие устройства широко используются при озвучении открытых пространств: вокзалов, стадионов, праздничных улиц и площадей, а также больших помещений. Однако существующие звуковоспроизводящие устройства имеют недостаток: громкость воспроизведения звука в них не меняется в зависимости от уровня естественного шума в помещении или на воздухе. Так, музыка или речь, передаваемые уличными громкоговорителями днем с нормаль-

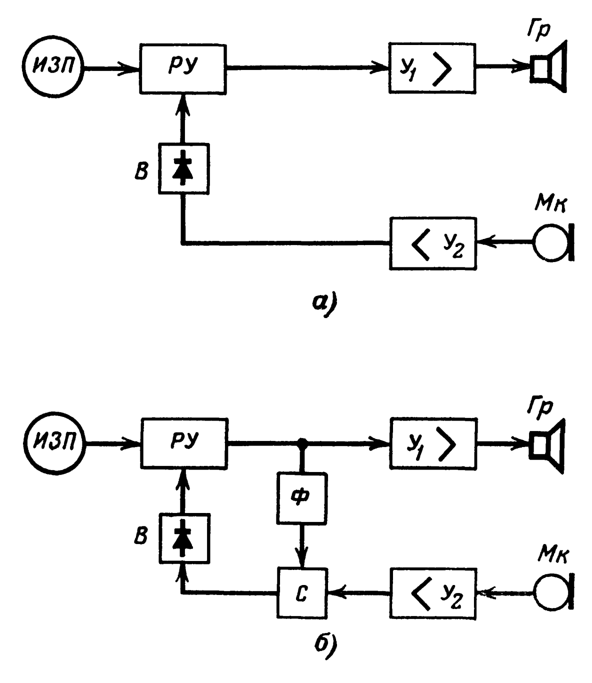


Рис. 44. Блок-схемы звуковоспроизводящих устройств с автоматическим регулированием громкости звука в зависимости от уровня окружающего шума.

ной громкостью, вечером становятся излишне громкими. В то же время при возрастании шума на улице, например от проходящего транспорта, воспроизводимая передача часто заглушается

Устранить указанный недостаток можно, применив в звуковоспроизводящем устройстве РУ. На рис. 44,*а* приведена блок-схема

такого звуковоспроизводящего устройства Сигналы с источника звуковой программы *ИЗП* усиливаются *РУ* и усилителем $У_1$ и воспроизводятся громкоговорителем *Гр,* размещенным в озвучиваемом помещении (или на открытом воздухе). В том же помещении в месте наибольшего воздействия мешающего шума устанавливают микрофон *Мк* направленного действия.

Предположим, что уровень шума в помещении возрос по какой-либо причине Напряжение шума, получаемое с микрофона *Мк,* после усиления и выпрямления соответственно усилителем $У_2$ и выпрямителем *В* увеличится, что приведет к повышению коэффициента усиления *РУ* и возрастанию громкости воспроизводимой передачи Таким образом, громкость звуковоспроизведения оказывается зависимой от уровня шума в помещении

Вероятно, не всегда можно найти в помещении место для установки микрофона достаточно далеко от громкоговорителя, т. е. там, где он воспринимал бы в основном мешающий шум, а не воспроизводимую громкоговорителем передачу Звуковоспроизводящее устройство, блок-схема которого показана на рис 44,*б*, менее склонно к самовозбуждению и позволяет располагать микрофон *Мк* в любой точке помещения В этом случае на него воздействуют как шум помещения, так и воспроизводимая громкоговорителем передача Общее звуковое напряжение с микрофона *Мк* через усилитель $У_2$ поступает на один из входов сумматора *С*. На другой его вход через усилитель-фазовращатель *Ф* подается напряжение, вырабатываемое *ИЗП.* В результате компенсации на выходе сумматора образуется напряжение одного лишь шума в помещении, которое затем выпрямляется выпрямителем *В*. Значение выпрямленного напряжения, подаваемого на управляющий вход *РУ,* определяет его усиление. При возрастании шума в помещении управляющее напряжение, снимаемое с выпрямителя *В,* также увеличится, что приведет к повышению коэффициента усиления *РУ* и как следствие этого — к увеличению громкости воспроизводимой передачи

Усилитель-фазовращатель позволяет менять как фазу, так и амплитуду сигнала, поступающего на сумматор Соотношение двух напряжений, подаваемых на входы сумматора, и их фазы нужно выбрать такими, чтобы значение напряжения, получаемого на его выходе, зависело только от уровня шума в помещении Для этого фазы сигналов, поступающих на входы сумматора, должны отличаться на 180°, если выбранный тип сумматора работает по принципу сложения (смешивания) и на его выходе получается сумма входных сигналов, или на 0°, если сумматор работает по принципу вычитания и на его выходе получается разность входных сигналов Исходя из этого выбирается и фазовая характеристика усилителя-фазовращателя *Ф*. В частности, для второго случая, когда сумматор производит вычитание сигналов, фазовая характеристика усилителя-фазовращателя должна совпадать с суммарной (сквозной) фазовой характеристикой усилителей $У_1$ и $У_2$, громкоговорителя *Гр* и микрофона *Мк*. При незначительном рассогласовании характеристик элементов схемы появляется опасность самовозбуждения.

Источником звуковой программы *ИЗП* может быть радиоприемник, трансляционная линия, магнитофон, фотоэлемент кинопроектора, дикторский микрофон и т д.

Звуковоспроизводящее устройство с РУ радиолюбители могут использовать в своих конструкциях, предназначенных для озвучивания больших помещений и открытых пространств Оно может быть

применено в местах с неравномерным уровнем окружающего шума, как, например, на улицах и площадях с интенсивным уличным движением, в аэропортах, на станциях и в вагонах метрополитена, на перронах и в залах ожидания вокзалов, когда гудки локомотивов и проходящий поезд мешают прослушиванию объявлений по радиосети, в зрелищных и тому подобных учреждениях (зрительные залы, кино на открытом воздухе, эстрада, стадион), где реакции зрителей или слушателей заглушают передаваемую громкоговорителем программу.

Такое устройство можно использовать и в бытовой аппаратуре, например при просмотре телепередач в вечернее время «вполголоса», если шум проходящего мимо окон транспорта периодически заглушает звук телевизора.

КОРРЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ

Для высококачественного воспроизведения звука необходимо, чтобы звуковоспроизводящая установка обеспечивала пропускание полосы частот от 30—50 *гц* до 10—15 *кгц* с неравномерностью не более 2 *дб*. Современные громкоговорители имеют в основном более узкий диапазон частот, а неравномерность частотной характеристики у них составляет 10—15 *дб*.

Для получения широкой полосы частот конструкторы вынуждены пользоваться различными приемами: прикреплять громкоговорители к огромным щитам, встраивать их в сложнейшие фазоинверторы и акустические лабиринты, применять параллельное включение

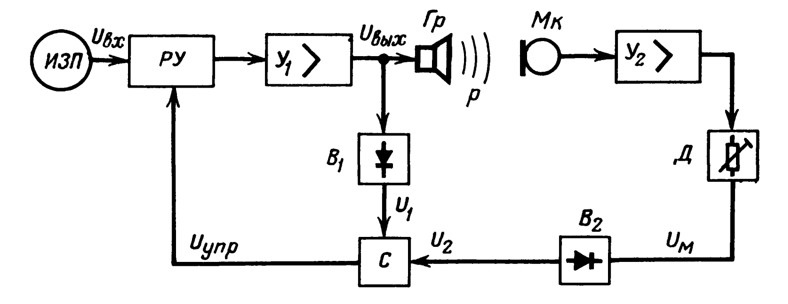


Рис. 45. Блок-схема устройства для корректирования частотной характеристики громкоговорителя.

нескольких однотипных громкоговорителей со сдвинутыми по отношению друг к другу резонансными частотами

Однако в ряде случаев, например в электромузыкальных инструментах с поочередным воспроизведением звуков, можно избежать этих трудностей, если использовать в звуковоспроизводящей установке устройство с РУ, исправляющее частотную характеристику громкоговорителей. Это устройство автоматически увеличивает или уменьшает подводимое к громкоговорителю напряжение на частотах, на которых его звуковая отдача соответственно мала или велика. Блок-схема устройства приведена на рис. 45. Сигнал с источника звуковой программы *ИЗП* после усиления подается на *РУ*,

а с него — на усилитель низкой частоты $У_1$, к выходу которого подключены громкоговоритель *Гр* и выпрямитель $В_1$ Против громкоговорителя установлен микрофон *Мк*, к которому присоединены усилитель $У_2$ и второй выпрямитель $В_2$. Выходы обоих выпрямителей через схему сложения (сумматор) *С* подключаются к управляющей цепи РУ.

Выпрямители $В_1$ и $В_2$ должны быть выполнены по схемам, дающим логарифмическую зависимость выходного напряжения от входного, причем с выпрямителя $В_1$ снимается напряжение положительной полярности, а с выпрямителя $В_2$ — отрицательной

Напряжение на выходе выпрямителей равно:

$$U_1 = K_{в} \lg U_{вых};$$

$$|-U_2| = K_{в} \lg U_{м},$$

где $K_{в}$ — коэффициент пропорциональности, связанный с параметрами выпрямителей.

Поскольку напряжение, подаваемое на вход выпрямителя $В_2$, пропорционально звуковому давлению p, то

$$U_{м} = K_{м} K_{у} K_{д} p,$$

где $K_{м}$, $K_{у}$, $K_{д}$ — коэффициенты передачи соответственно микрофона, усилителя $У_2$ и делителя *Д*, или

$$|-U_2| = K_{в} \lg K_{м} K_{у} K_{д} p.$$

Управляющее напряжение, подаваемое на РУ,

$$U_{упр} = U_1 + (-U_2) = U_1 - U_2 = K_{в} \lg \frac{U_{вых}}{K_{м} K_{у} K_{д} p}.$$

На какой-то одной частоте, например 1 000 *гц*, звуковое давление p пропорционально напряжению на звуковой катушке громкоговорителя:

$$p = K_{гр} U_{вых},$$

где $K_{гр}$ — коэффициент передачи громкоговорителя (относительная отдача громкоговорителя) на данной частоте. Тогда

$$U_{упр} = U_1 - U_2 = K_{в} \lg \frac{U_{вых}}{K_{м} K_{у} K_{д} p} = K_{в} \lg \frac{1}{K_{м} K_{у} K_{д} K_{гр}}.$$

Регулировкой коэффициента передачи делителя *Д* (в качестве которого может служить потенциометр или постоянные резисторы) можно добиться, чтобы на какой-либо частоте, например на той же частоте 1 000 *гц*, управляющее напряжение, подаваемое на РУ, было равно нулю, т. е. были бы равны по величине напряжения U_1 и U_2.

$$U_1 = |-U_2|.$$

Поэтому выражение под логарифмом будет равно единице, а коэффициент передачи делителя *Д* определится как

$$K_{д} = \frac{1}{K_{м} K_{у} K_{гр}}.$$

В выражении

$$U_{упр} = K_{в} \lg \frac{1}{K_{м} K_{у} K_{д} K_{гр}}$$

все коэффициенты на данной выбранной нами частоте являются постоянными величинами, поэтому при работе на этой частоте всегда $U_{упр}=0$ и никакой регулировки не происходит. Однако при переходе на какую-либо другую частоту, на которой частотная характеристика имеет, предположим, пик, возрастает звуковое давление p при таком же напряжении $U_{вых}$, подаваемом на громкоговоритель, иными словами, увеличится коэффициент передачи громкоговорителя $K_{гр}$ на этой частоте.

В приведенном выше выражении знаменатель дроби, стоящей под логарифмом, становится отличным от единицы (для нашего примера меньше единицы), напряжение $U_{упр}$ уже не будет равно нулю. В самом деле, при возрастании звукового давления p увеличивается отрицательное напряжение U_2, как это видно из выражения

$$|-U_2| = K_{в} \lg K_{м} K_{у} K_{д} p.$$

Это отрицательное напряжение с выпрямителя B_2 становится больше положительного напряжения, снимаемого с выпрямителя B_1, и на управляющий вход РУ поступает разностное напряжение отрицательной полярности, уменьшающее усиление РУ, а с ним и общее усиление сигнала и тем самым устраняющее пик. Точно так же уменьшение звуковой отдачи громкоговорителя из-за спада его частотной характеристики на низших или высших звуковых частотах вызывает увеличение усиления, компенсирующее этот спад

В данном устройстве следует применять микрофон направленного действия, располагая его в непосредственной близости от громкоговорителя, чтобы он воспринимал в основном прямую акустическую энергию, не отраженную от стен помещения, а также чтобы избежать попадания в микрофон постороннего шума в помещении

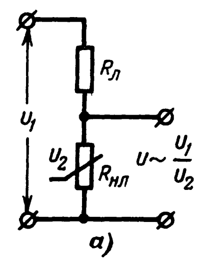
Рассмотренная схема обладает существенным недостатком. Она может применяться только в одноголосных электромузыкальных инструментах. При одновременном воспроизведении всего спектра частот микрофон будет сразу реагировать на низшие, средние и высшие частоты и рассматриваемая схема регулировки не будет работать

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

По мере развития науки и техники повышается роль исследований в изучении явлений окружающего нас мира. Эксперименты становятся все более сложными, увеличивается число приборов, используемых в каждом эксперименте, что приводит к дополнительным затратам времени и труда на их проведение. Дело усугубляется еще тем, что в существующих измерительных средствах косвенные (т. е. вычислительные) методы измерений преобладают над прямыми. Ученому-экспериментатору приходится снимать многочисленные вспомогательные замеры и затем производить однообразные

вычисления. Новая область измерительной техники — автоматизация радиоизмерений — как раз и предполагает заменить, где это возможно, косвенные методы измерения прямыми.

Приведем пример из радиолюбительской практики. При построении частотной и амплитудной характеристик усилителя приходится вычислять коэффициент усиления для различных частот и входных напряжений, находя отношение выходного напряжения на данной частоте к выходному напряжению на средней частоте или к входному напряжению. При построении этих характеристик, а также в других аналогичных случаях измерения могли бы существенно упроститься и ускориться, если бы измерительный прибор одновременно производил математическую операцию — находил отношение напряжений двух непрерывных сигналов и выдавал результат на индикатор, шкала которого проградуирована в относительных единицах или децибелах.



Измерить отношение изменяющихся на-

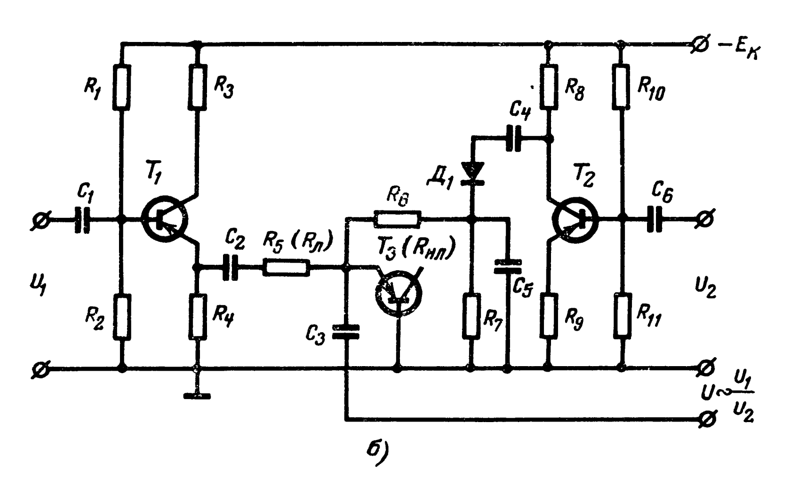


Рис. 46. Принцип измерения отношений двух напряжений с помощью управляемого делителя напряжения (*а*) и принципиальная схема измерителя отношений (*б*).

пряжений U_1/U_2 можно, используя управляемый делитель напряжения (рис. 46,*а*), сопротивление нижнего плеча которого изменяется от величины управляющего напряжения, в данном случае напряжения U_2. Если на вход делителя подать переменное напряжение U_1, то ламповый вольтметр, подключенный на выход делителя, покажет значение, пропорциональное отношению напряжений U_1 и U_2.

В этой схеме ламповый вольтметр должен измерять часть напряжения U_1, падающую на нелинейном элементе $R_{нл}$, а напряжение U_2 должно лишь менять сопротивление элемента $R_{нл}$. По-

этому нелинейный элемент должен иметь разделенные цепи управления и сигнала либо управление им должно производиться напряжением постоянного тока, полученным путем линейного детектирования напряжения U_2. Регулятор усиления в этой схеме должен иметь вогнутую убывающую регулировочную характеристику (вида *Д*). Такой характеристикой обладают РУ с фоторезистором (рис. 30) и некоторые схемы на транзисторах и диодах.

Приведенная на рис. 46,*б* схема измерителя отношений состоит из эмиттерного повторителя и усилителя на транзисторах T_1 и T_2 соответственно, детектора на диоде $Д_1$ и цепи управления с транзистором T_3, в котором используется его переход эмиттер — база. Диапазон измерений схемы составляет 40 *дб*.

Много времени экспериментатор затрачивает также на поддержание постоянства различных напряжений, изменяющихся в процессе проведения эксперимента после каждого замера при изменении каких-либо параметров схемы. Если питающие напряжения еще можно поддерживать с помощью стабилизаторов напряжения, то со стабилизацией переменных напряжений сигнала дело обстоит хуже. При снятии, например, частотных характеристик усилителей низкой частоты или фильтров экспериментатору приходится подстраивать генератор входного сигнала, поскольку напряжение генератора сильно меняется с изменением частоты и входного сопротивления исследуемого усилителя или фильтра. Поэтому желательно, чтобы измерительный генератор обеспечивал постоянство выходного напряжения с достаточной точностью.

В настоящее время выпускается лишь небольшое количество типов измерительных генераторов со стабилизацией выходного напряжения, а в радиолюбительских лабораториях они вообще являются редкостью. Стабилизацию в промышленных генераторах обычно осуществляют двумя способами: охватом генераторных и усилительных каскадов глубокой отрицательной обратной связью с включением в цепь обратной связи терморезисторов или же применением автоматической регулировки усиления. Наибольшее применение нашли схемы с терморезисторами в цепи обратной связи, хотя схемы с АРУ обладают более высокой эффективностью и имеют меньшие габариты и вес. Основная причина этого — дополнительные нелинейные искажения, вносимые применявшимися раньше регулируемыми усилителями. При использовании более совершенных регуляторов этот метод может оказаться перспективнее, чем метод стабилизации с использованием терморезисторов.

В радиолюбительских конструкциях измерительных генераторов можно осуществить стабилизацию выходного напряжения с помощью АРУ, используя одну из приведенных в книге схем регулируемых усилителей. Последний включается в цепь сигнала генератора, а управляющее напряжение на него подается с детектора, подключенного на выход генератора. При этом схема АРУ работает аналогично схемам компрессора.

Используемые в АРУ регулируемые усилители могут иметь сравнительно небольшой диапазон регулирования. Важно лишь, чтобы регулируемый усилитель вносил как можно меньше нелинейных искажений, во всяком случае не более 0,3—0,5%. С этой целью следует применять схемы РУ, дающие минимальные нелинейные искажения, например с варисторами и терморезисторами, а также схемы на лампах и транзисторах, использующие при регулировке отрицательную обратную связь.

НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ И АКУСТИКЕ

Областей применения РУ так много, что в одной небольшой книге невозможно рассказать подробнее о каждой из них, но обойти их молчанием также нельзя.

Много новинок появилось например, в области электромузыки. В электромузыкальных инструментах широко используется свойство фоторезисторов изменять свое сопротивление не только для регулирования громкости звучания, но и для других целей. С их помощью можно плавно управлять интенсивностью отдельных звуковых компонентов сложного музыкального колебания и формой электрических характеристик фильтров и формантных контуров, плавно изменяя тембр звука. Такое управление производится отдельными коленными регуляторами и педалями, которые связаны со шторками, изменяющими падающий на фоторезистор световой поток. Изменение сопротивления фоторезисторов приводит к необходимым изменениям электрических характеристик фильтров и формантных контуров, влияя тем самым на тембральную окраску и фазовые соотношения гармоник звуковых сигналов.

Для воспроизведения на электромузыкальных инструментах сигналов ритмического характера используются электронные и механические устройства, управляющие работой регулируемых усилителей. На вход РУ подаются сигналы от различных тональных и шумовых источников, которые затем смешиваются в общем канале.

Одно из таких механических устройств содержит кольцо из гибкой ленты, на поверхности которой приклеены токопроводящие пленки различной конфигурации. По движущейся ленте скользят контакты, при этом в зависимости от комбинации замыкаемых контактов меняется управляющее напряжение РУ данного канала. Темп скачков громкости зависит от расстояния между токопроводящими пленками, а тембр музыкального произведения — от скорости передвижения ленты Другое устройство представляет собой вращающийся цилиндр с отверстиями, прерывающими световой поток на фоторезисторы регулируемых усилителей. Изменяя форму отверстий путем перемещения световых пучков в направлении оси цилиндра, можно управлять тембрами и атаками звуков, имитируя тем самым звучание различных ударных инструментов.

Аналогичным образом, используя РУ с фоторезистором в управляющей цепи и цилиндр или диск с отверстиями, можно получать и эффект тремоло — периодическое скачкообразное изменение уровня суммарного звука инструмента с частотой 10—15 *гц*, напоминающее звучание струнных инструментов, на которых играют щипком (мандолина, балалайка, банджо). Частота тремоло здесь будет определяться скоростью вращения диска или цилиндра.

На рис. 7,*а* была приведена схема компенсированного регулятора громкости, осуществляющая подъем низших частот при уменьшении звука потенциометрическим регулятором громкости. Встречаются устройства, которые осуществляют подъем частотной характеристики усилителей автоматически при снижении уровня входного сигнала. В одном из таких устройств весь звуковой диапазон разделяется на три канала, соответствующие НЧ-, СЧ- и ВЧ-областям диапазона. В каждый канал включается РУ, коэффициент передачи которого изменяется обратно пропорционально изменению входного сигнала. Схема устройства выполнена таким обра-

зом, что при уменьшении уровня входного сигнала выходной сигнал в области низших и высших частот ослабляется в меньшей степени, чем сигнал в области средних звуковых частот.

В этом устройстве РУ работает с фоторезистором, освещаемым лампочкой, которая питается выпрямленным напряжением сигнала. Сопротивление фоторезистора в зависимости от освещенности изменяется от нескольких сотен мегоом до 100 *ом*.

В другом устройстве автоматической тонкомпенсации входной сигнал разделяется на два канала. Первый канал содержит заграждающий фильтр, настроенный на частоту 1 000 *гц*, и на его выходе присутствуют низшие и высшие частоты. Второй канал содержит РУ с фоторезистором и лампочкой, питаемой напряжением входного сигнала. Выходы обоих каналов подключаются к смесителю.

При воспроизведении слабого сигнала коэффициент усиления РУ минимален, и на его выходе преобладают низшие и высшие частоты. На частоте 20 *гц* частотная характеристика имеет подъем на 10 *дб*, а на частоте 20 *кгц* — на 5 *дб* выше по сравнению с частотами в области 1 000 *гц*. При максимальном сигнале (50 *дб*) выходное напряжение определяется в основном максимальным коэффициентом усиления РУ и не зависит от частоты, поскольку влияние канала с фильтром на 1 000 *гц* проявляется несравненно слабее.

В системе звукоусиления с несколькими микрофонами может использоваться устройство, которое с приближением исполнителя к одному из микрофонов автоматически отключает все другие микрофоны системы. Это позволяет резко снизить уровень шумов системы и уменьшить вероятность попадания в микрофон посторонних звуков. В звуковоспроизводящем устройстве используются РУ с фоторезистором и лампочкой, подключенной к небольшому усилителю входного сигнала. Когда входной сигнал с какого-либо микрофона становится ниже некоторого заданного уровня, то лампочка не загорается и коэффициент передачи РУ, подключенного к данному микрофону, падает. Для устранения щелчков в громкоговорителе, возникающих при резком уменьшении сигнала ниже порогового уровня, лампа гаснет не мгновенно, а постепенно благодаря наличию *RC*-цепочки в управляющем усилителе.

Как указывалось в гл. 6, схема звуковоспроизводящего устройства с автоматическим регулированием громкости звука в зависимости от уровня окружающего шума (рис. 44,*а*) имеет склонность к самовозбуждению из-за наличия петли положительной обратной связи через громкоговоритель и микрофон. Для устранения этого недостатка недавно предложено вводить в эту схему цепь отрицательной обратной связи, состоящую из еще одного РУ, подключаемого входными клеммами к выходу усилителя $У_1$, и выпрямителя, напряжение с которого подают на управляющий вход РУ, изображенного на рис. 44,*а*. Выход выпрямителя *В*, показанного на этом рисунке, в этом случае подключают уже к управляющему входу второго РУ, находящегося в цепи отрицательной обратной связи. Действие обоих обратных связей — отрицательной электрической и положительной акустической — приводит к балансу, который нарушается лишь при возрастании уровня окружающего шума, что вызывает соответствующее увеличение уровня громкости на выходе устройства.

В одном из устройств, собранном по схеме на рис. 44,*а*, в РУ фоторезисторы включены как в верхнее, так и нижнее плечи управляемого делителя напряжения. Между фоторезисторами и лампочками накаливания расположен диск с вырезами, вращение которого определяется величиной напряжения на выходе усилителя. При возрастании шума в помещении диск поворачивается в одну сторону, расширяется вырез против одного фоторезистора (в верхнем плече делителя) и сужается против другого. Уровень звука в громкоговорителе возрастает. Если шум в помещении уменьшается, то диск вращается в другую сторону и уровень звука в громкоговорителе падает.

Этот способ управления РУ можно кстати, использовать и в компрессорах, экспандерах и других автоматических регулировках. Здесь мы имеем комбинацию элементов двух РУ: электромеханического и с фоторезистором. В отличие от электромеханических регуляторов рассматриваемый РУ не содержит потенциометра с перемещающимся движком, а следовательно, более надежен в эксплуатации.

Большой интерес представляет звуковоспроизводящее устройство, позволяющее имитировать эффект стереофонического звучания при монофонической (одноканальной) звуковой передаче. Устройство состоит из двух одинаковых громкоговорителей (или акустических агрегатов), расположенных на некотором расстоянии друг от друга. В усилителе устройства входной звуковой сигнал разделяется на два канала, каждый из которых содержит РУ с включенным перед ним фильтром. На выходе одного РУ преобладают высшие частоты, а на выходе второго — низшие. Сигналы с обоих РУ смешиваются в общем канале.

Регулируемые усилители поочередно плавно переключаются из одного крайнего состояния (например, запертого) в другое (отпертое). Управляющие напряжения на эти РУ, сдвинутые относительно друг друга на 180°, снимаются с фазоинвертора, подключенного к электронному или электромеханическому генератору. Период переключения составляет около 15 *сек*. Такое чередование тембров, по утверждению специалистов, благоприятно действует на слушателей, создавая эффект, близкий к стереофоническому.

Кроме указанных применений, в последнее время предложено использовать регулируемые усилители при замедленном воспроизведении записи речи, при автоматическом переключении приемника на прием стереофонических или монофонических передач, автоматическом переключении тембров звуковоспроизводящего устройства в зависимости от передачи музыки или речи и в других случаях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы рассмотрели большое количество схем РУ. Необходимо отметить, что в настоящее время нет схемы РУ, способной удовлетворить предъявляемым требованиям. Усилители с фоторезисторами и магниторезисторами показывают положительные результаты по диапазону регулирования и нелинейным искажениям, но они мо-

гут быть применены далеко не во всех случаях из-за большого разброса параметров и температурной нестабильности этих элементов. Другие же РУ, например на электронных лампах, наоборот, имеют лучшие показатели по стабильности параметров и большой коэффициент усиления, но у них меньше диапазон регулирования, больше искажений и меньше надежность работы; кроме того, они требуют использования нескольких питающих напряжений.

При разработке схем регулируемых усилителей можно воспользоваться советами, предложенными в настоящей книге. Так, для повышения диапазона регулирования и уменьшения нелинейных искажений можно применить последовательное включение нескольких РУ, а также комбинированные способы регулирования усиления. Резкого снижения искажений можно добиться, включив любой регулируемый усилитель в цепь обратной связи низкочастотного усилителя, т. е. осуществить управляемую отрицательную обратную связь по напряжению.

Второй путь разработки схем усилителей состоит в создании принципиально новых способов включения существующих электронных приборов, а также использовании в схемах РУ новых видов и типов электровакуумных и полупроводниковых приборов. В частности, желательно проверить, как будут работать в РУ двухбазовые и двухэмиттерные транзисторы, которые в скором времени могут быть в распоряжении радиолюбителя. Очевидно, здесь в первую очередь следует использовать вторую базу (или второй эмиттер) для подачи управляющего напряжения.

В управляемом делителе напряжения можно использовать новый вид полупроводникового резистора с регулируемой толщиной проводящего покрытия (этот прибор пока еще не имеет названия) Он представляет собой герметически закрытую керамическую или стеклянную трубку, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем какого-либо металла. При подключении его к источнику напряжения через проводящий слой начинает проходить электрический ток, нагревая этот слой. В результате этого часть покрытия испаряется и сопротивление резистора увеличивается. Для нагрева испаряемого слоя может использоваться также отдельный подогреватель, электрически изолированный от слоя (подобно терморезисторам косвенного подогрева). Диапазон регулирования РУ с этим прибором может оказаться очень большим.

Рассмотренные выше случаи применения РУ далеко не исчерпывают всех заложенных в них возможностей. Регулируемые усилители широко используются также в технике дальней связи, радиовещании и телевидении, в слуховых аппаратах, в имитаторах шумов космических, авиационных и автомобильных тренажеров и т. п.

Автор стремился дать в этой книге советы по разработке и применению регулируемых усилителей Если она поможет более широкому распространению РУ и созданию новых способов регулирования усиления, автор будет считать свою задачу выполненной.

ЛИТЕРАТУРА

Кобзев В. В., Шишмаков В. Н., Каскады радиоприемников на транзисторах, Госэнергоиздат, 1960.

Палшков В. В., Радиоприемные устройства, изд-во «Связь», 1965.

Власов В. В., Электронные и ионные приборы, Связьиздат, 1960.

Степаненко И. П., Теория транзисторов и транзисторных схем, изд-во «Энергия», 1967.

Крылов Г. М., Смирнов Г. А., Транзисторные усилители с автоматической регулировкой усиления, изд-во «Энергия», 1967.

Пасынков В. В. и др. Полупроводниковые приборы, изд-во «Высшая школа», 1966.

Олеск А. О., Фоторезисторы, изд-во «Энергия», 1966.

Крисилов Ю. Д., Испытание схемы АРУ транзисторных усилителей, сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», под ред. Я. А. Федотова, изд-во «Советское радио», 1963, вып. 9, стр. 224—229.

Симонов И. Д., Новое в электромузыкальных инструментах (Массовая радиобиблиотека), изд-во «Энергия», 1966.

Цена 24 коп.